

Departamento de Engenharia Civil

**ANÁLISE DO FENÓMENO DE RUPTURA DE BARRAGENS  
DE ATERRO COM VISTA À HIERARQUIZAÇÃO DO  
PERIGO ASSOCIADO AO CONJUNTO BARRAGEM E  
ALBUFEIRA**

Pedro Gonçalo Pessoa Martins

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Mário Jorge Pereira da Franca

**JÚRI**

**Presidente:** Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

**Vogais:** Prof. Doutor João Gouveia Bento Leal

Prof. Doutor Mário Jorge Pereira da Franca

Junho de 2012



Departamento de Engenharia Civil

**ANÁLISE DO FENÓMENO DE RUPTURA DE BARRAGENS  
DE ATERRO COM VISTA À HIERARQUIZAÇÃO DO  
PERIGO ASSOCIADO AO CONJUNTO BARRAGEM E  
ALBUFEIRA**

Pedro Gonçalo Pessoa Martins

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Professor Mário J. Franca

Junho de 2012



"Copyright" Pedro Gonçalo Pessoa Martins, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ci4ncias e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perp4tuo e sem limites geogr4ficos, de arquivar e publicar esta dissertação atrav4s de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar atrav4s de reposit4rios cient4ficos e de admitir a sua c4pia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado cr4dito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado sob orientação do Professor Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca. A ele quero expressar o meu profundo agradecimento pela orientação nesta dissertação, acompanhamento permanente e interesse que sempre demonstrou na concretização deste trabalho, pelos conhecimentos e conselhos transmitidos e por toda a disponibilidade demonstrada.

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, pelo apoio e incentivo que sempre me facultaram para a concretização dos meus objectivos, não só nesta fase final da minha formação superior, mas também ao longo de toda a minha vida académica e pessoal.

A todos os meus amigos, pela paciência e carinho demonstrado e que de uma maneira ou de outra, sempre me apoiaram e incentivaram a atingir os meus objectivos.

Aos meus colegas de curso, também eles meus amigos, com quem adquiri e partilhei conhecimento, pelo apoio e amizade sempre demonstrada ao longo deste percurso.





## RESUMO

Não obstante a baixa probabilidade de ocorrência, as consequências resultantes de uma cheia resultante da ruptura de uma barragem obrigam os organismos responsáveis pela segurança e protecção civil e a comunidade técnico-científica a debruçarem-se sobre a fenomenologia deste tipo de acidentes para estudar e planear soluções de prevenção e mitigação dos seus efeitos. Métodos sistemáticos e expeditos de avaliação do nível de perigo associado a barragens são úteis na análise de risco. A rápida mas fundamentada estimativa do risco permitirá uma correcta hierarquização de eventuais intervenções em estruturas existentes.

Na presente dissertação é abordado o conceito de classificação da perigosidade de albufeiras tendo em conta a sensibilidade do caudal máximo, resultante de uma ruptura, às taxas de erosão e de descida do nível da albufeira. Com base em resultados de simulações sistemáticas realizadas com um modelo de ruptura propõe-se uma expressão para a classificação de albufeiras.

Aborda-se ainda uma metodologia simplificada para estimar o caudal máximo recorrente da ruptura de uma barragem em aterro com base em parâmetros facilmente estimáveis no terreno.

Palavras-chave: ruptura, barragem, perigosidade, classificação de barragens/albufeiras



## ABSTRACT

Although associated to a low probability of occurrence, the consequences of a flood resultant from the rupture of a dam make responsible organisms for security and civil protection and the technical and scientific community lean on the phenomenology of this kind of accidents, in order to study and plan adequate prevention and mitigation solutions for their effects. Systematic and expedite methods of evaluation on the level of danger associated to dams are useful in risk analyses. Fast but funded risk estimation approaches allow a proper hierarchization of eventual interventions on existing structures.

In the present dissertation, the concept of dangerousness classification of the ensemble dam/reservoir is approached, based on the sensitivity of the maximum flow resultant from a rupture, at the erosion rates and the reservoir depletion. Based on the results of systematic simulations performed with a dam breaching model, an expression to classify the ensemble dam/reservoir is proposed.

A simple methodology to estimate the maximum flow recurrent of an earthen dam rupture, based on easily estimated parameters on the field and assuming determined simplifications, is proposed.

Keywords: rupture, dam, dangerousness, dam/reservoir classification



---

**ÍNDICE GERAL**

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações Gerais .....	1
1.2	Enquadramento Legal .....	1
1.3	Objectivos.....	3
1.4	Conteúdo da Dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica sobre Ruptura de Barragens.....</b>	<b>5</b>
2.1	Considerações Gerais .....	5
2.2	Causas e Mecanismos de Rupturas em Barragens .....	5
2.3	Modelos de Simulação de Brechas .....	8
2.4	Classificação de Albufeiras .....	19
2.4.1	Parametrização de Walder e O'Connor .....	19
2.4.2	Albufeira Grande .....	19
2.4.3	Albufeira Pequena.....	20
2.5	Previsão do Caudal Efluente.....	21
<b>3</b>	<b>Modelo RoDaB.....</b>	<b>23</b>
3.1	Considerações Gerais .....	23
3.2	Esvaziamento da Albufeira.....	24
3.2.1	Equação de Continuidade .....	24
3.2.2	Caudal Efluente por Galgamento do Coroamento .....	25
3.2.3	Caudal Efluente pela Brecha.....	25
3.3	Evolução da brecha .....	26
3.3.1	Equação de Erosão .....	26
3.3.2	Modelo Empírico de Evolução da Brecha .....	27
3.3.3	Modelo Semi-empírico de Evolução da Brecha .....	28
3.3.4	Modelo Racional de Evolução da Brecha.....	28
3.4	Entrada e Saída de Dados .....	29
<b>4</b>	<b>Classificação de Albufeiras e Estimação de Caudal Máximo Efluente.....</b>	<b>31</b>
4.1	Considerações Gerais .....	31
4.2	Relação entre a Evolução do Nível na Albufeira e o Caudal Efluente.....	32
4.3	Modelo Simplificado da Brecha .....	34
4.4	Análise Dimensional .....	38
4.4.1	Parâmetro de Classificação de Albufeira.....	38
4.4.2	Caudal Máximo Efluente.....	40
4.5	Dados de Base.....	41
4.5.1	Validação e Calibração dos Parâmetros de Erosão da Brecha .....	41

4.5.2 Resultados das Simulações do Modelo RoDaB .....	41
4.5.3 Curva de Volumes .....	42
4.6 Classificação de Albufeiras .....	43
4.6.1 Procedimento de cálculo .....	43
4.6.2 Determinação do Limite entre Grande Albufeira e Pequena Albufeira .....	44
4.6.3 Proposta de Classificação de Albufeiras .....	48
4.7 Caudal Máximo Efluente .....	49
<b>5 Aplicação a Casos de Estudo .....</b>	<b>53</b>
5.1 Breve apresentação das barragens em estudo .....	53
5.1.1 Barragem do Sabugal .....	53
5.1.2 Barragem de Vale do Gaio .....	53
5.1.3 Barragem de Malhada do Peres .....	53
5.1.4 Barragem de Vaqueiros .....	54
5.1.5 Barragem de Santa M <sup>a</sup> de Aguiar .....	54
5.2 Classificação de Albufeiras .....	55
5.3 Caudal Máximo Efluente .....	58
<b>6 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....</b>	<b>59</b>
6.1 Conclusões .....	59
6.2 Desenvolvimentos Futuros .....	59
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>65</b>
ANEXO A - Dados utilizados na proposta de classificação do conjunto barragem/albufeira .....	67

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da brecha provocada por galgamento numa barragem de aterro (Johnson e Illes, 1976) (i – brecha inicial; ii – a brecha atinge a base da barragem com a sua forma de “V”; iii – verificação de erosão lateral).....	7
Figura 2.2 – Zonas de regime de escoamento e zonas de erosão durante o galgamento de uma barragem de aterro - adaptado de Powledge et al (1988): Zona 1 – Fraca tensão de arrastamento; Zona 2 – Tensão de arrastamento elevada; Zona 3 – Tensão de arrastamento muito elevada com elevado potencial erosivo. ....	8
Figura 2.3 – Exemplo da variação no tempo do caudal em função da cota de soleira da brecha – albufeira “grande” (janela de visualização do programa RoDaB).....	19
Figura 2.4 – Exemplo da variação no tempo do caudal em função da cota de soleira da brecha – albufeira “pequena” (janela de visualização do programa RoDaB) .....	20
Figura 3.1 – Imagem da janela principal do programa RoDaB .....	29
Figura 3.2 – Imagem da apresentação de resultados do RoDaB (análise gráfica) .....	30
Figura 4.1 – Modelo geométrico da brecha .....	32
Figura 4.2 – Exemplo de variação do caudal na brecha, do volume da albufeira e da derivada ( $dV/dt$ ). (in Franca, 2002) .....	33
Figura 4.3 – Modelo considerado no cálculo da variação do fundo da brecha.....	35
Figura 4.4 – Exemplo ilustrativo da evolução da brecha rectangular .....	37
Figura 4.5 – Curva de volumes genérica.....	43
Figura 4.6 – Representação gráfica da determinação do limite entre “grande” e “pequena” albufeira. ....	44
Figura 4.7 – Imagem de exemplo de curva de volumes no modelo RoDaB .....	46
Figura 4.8 – Imagem de exemplo das características da barragem no modelo RoDaB .....	46
Figura 4.9 – Imagem de exemplo da selecção do tipo de ruptura e do método de evolução da brecha no modelo RoDaB .....	47
Figura 4.10 – Imagem de exemplo da introdução dos coeficientes de erosão da brecha e da largura média da mesma.....	47
Figura 4.11 – Resultado gráfico da análise computacional do limite entre “pequena” e “grande” albufeira.....	48
Figura 4.12 – Exemplo do plano obtido com uma regressão linear bidimensional .....	49
Figura 5.1 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem do Sabugal .....	56
Figura 5.2 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem da Malhada do Peres .....	56
Figura 5.3 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem do Vale do Gaio.....	56
Figura 5.4 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem de Vaqueiros.....	56
Figura 5.5 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem de Santa M <sup>a</sup> de Aguiar ....	57
Figura 5.6 – Análise gráfica do perigo em caso de ruptura das barragens estudadas .....	57





## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Definição Classes RSB .....	2
Quadro 2.1 – Causas da ruptura de barragens, segundo em Johnson e Illes (1976) e em Singh (1996). 5	
Quadro 2.2 – Parametrização de brechas de barragens baseados em casos reais de rupturas (Singh, 1996) .....	9
Quadro 2.3 – Relação entre o volume do reservatório e a variável $C_B$ , para o cálculo da largura média da brecha (Von Thun e Gillette, 1990).....	12
Quadro 2.4 – Compilações de estudos sobre rupturas de barragens e respectivas estimativas dos parâmetros da brecha e do caudal efluente máximo.....	13
Quadro 2.5 – Modelos de brecha baseado em Almeida (2001), CADAM (2000b), Visser (1998) e Singh (1996). .....	15
Quadro 4.1 – Resumo dos resultados dos parâmetros da brecha obtidos por Garcia (2011) .....	41
Quadro 4.2 - Combinações dos parâmetros da brecha .....	45
Quadro 5.1 – Características gerais da barragem do Sabugal.....	53
Quadro 5.2 – Características gerais da barragem de Vale do Gaio.....	53
Quadro 5.3 – Características gerais da barragem de Malhada do Peres .....	54
Quadro 5.4 – Características gerais da barragem de Vaqueiros .....	54
Quadro 5.5 – Características gerais da barragem de Santa M <sup>a</sup> de Aguiar .....	54
Quadro 5.6 – Proposta de classificação das barragens em estudo .....	55
Quadro 5.7 – Resultados do caudal adimensional para cada barragem .....	58
Quadro 5.8 – Resultados do caudal máximo para cada barragem para métodos analítico e computacional.....	58



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_B$  - área de vazão da brecha [ $m^2$ ]

$A'_B$  - área de referência de vazão da brecha [ $m^2$ ]

$a_E$  - coeficiente de erosão do material do fundo [m]

$A_R$  - área de superfície da albufeira

$B$  - largura da brecha (geral)

$\bar{B}$  - largura média da brecha  $(B_{topo} + B_{fundo})/2$

$\bar{B}^*$  - largura média da brecha adimensional  $(\bar{B}/h_b)$

$B_{topo}$  - largura do topo da brecha

$B_{fundo}$  - largura do fundo da brecha

$C$  - coeficiente de vazão de uma soleira normal

$C_B$  - variável de acordo com o volume do reservatório

$C_C$  - coeficiente de vazão do coroamento da barragem [-]

$C_{s,b}$  - coeficiente de erosão do fundo da brecha [ $m^{1-\beta_{s,b}} s^{-1+\beta_{s,b}}$ ]

$C_{s,m}$  - coeficiente de erosão das margens da brecha; [-]

$C_v$  - coeficiente da brecha ( $m^{1/2} s^{-1}$ )

$d_{ovtop}$  - altura de galgamento na ruptura

$g$  - aceleração gravítica [ $ms^{-2}$ ]

$h_b$  - altura da brecha

$h_B$  - profundidade final da brecha [m]

$h_D$  - altura da barragem

$h_W$  - altura de água na ruptura, acima do fundo da brecha

$h_W^*$  - altura de água na ruptura, acima do fundo da brecha, adimensional

$k$  - taxa média de erosão da brecha [ $ms^{-1}$ ]

$K_C$  - factor de correcção da parede do núcleo (0,6 se a barragem contém parede do núcleo; 1,0 para outros casos);

$K_\theta$  - factor de correcção do galgamento (1,4 se a ruptura for por galgamento; 1,0 para outros casos)

$L_C$  – largura do coroamento [m]

$L'_C$  - comprimento do coroamento galgado [m]

$n$ ;  $n^*$  – relação entre o volume da albufeira e a altura da barragem que o suporta

$N$  – cota de água da barragem [m]

$N_B$  – cota do fundo da brecha [m]

$N_C$  - cota do coroamento da barragem [m]

$N_R$  – cota do nível da albufeira [m]

$N_0$  - cota mínima de água da albufeira [m]

$N^*$  - cota de água da barragem adimensional [-]

$Q^*$  - :parâmetro adimensional do caudal efluente máximo [-]

$Q_0$  – caudal total efluente pela brecha [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Q_B$  – caudal efluente através da brecha [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Q'_B$  – caudal de referência [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Q_C$  – caudal efluente por galgamento do coroamento [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Q_i$  – caudal afluente à albufeira resultante do hidrograma de cheia [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Q_{\text{máx}}$  – Caudal máximo efluente pela brecha [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$Q_P$  - caudal efluente máximo da brecha

$q_{s,b}$  – caudal de material sólido da parte inferior da brecha por unidade de área [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$S^*$  - volume da albufeira adimensional [ $V/h_b^3$ ]

$t$  – variável tempo [s]

$t_B$  - tempo de formação da brecha [s]

$t_f$  - tempo de formação da brecha (em horas)

$t_f^*$  - tempo de formação da brecha adimensional,  $t_f / \sqrt{gh_b}$  ( $t_f$ ,  $g$  e  $h_b$  têm que estar nas unidades que resultem num  $t_f^*$  adimensional.)

$U_B$  – velocidade média de escoamento na brecha [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$V$  - volume

$V_0^l$  – volume efluente da albufeira com destino a sumidouros “laterais” [ $\text{m}^3$ ]

- $V_0$  – volume efluente da albufeira através da brecha e por galgamento da barragem [ $m^3$ ]
- $V_a$  – volume afluente à albufeira resultante do hidrograma de cheia [ $m^3$ ]
- $V_B$  – volume efluente da albufeira através da brecha [ $m^3$ ]
- $V_C$  – volume efluente da albufeira por galgamento do coroamento da barragem [ $m^3$ ]
- $V_{er}$  - volume de material erodido do corpo da barragem
- $V_{out}$  - volume de água efluente pela brecha (Volume da albufeira + Volume do caudal afluente durante a ruptura)
- $V_R$  – Volume na albufeira [ $m^3$ ]
- $V_R$  – Volume inicial de água acima da cota final da brecha [ $m^3$ ]
- $V^*$  - volume de água da albufeira adimensional; [-]
- $W_B$  – largura da brecha [m]
- $\bar{W}^*$  - largura média da barragem adimensional  $(W_{coroamento} + W_{fundo}) / (2h_b)$
- $Z$  – factor de inclinação da parede lateral da brecha (Z horizontal:1 Vertical)
- $\alpha$  - constante de proporcionalidade com base em expressões calculadas analiticamente[-]
- $\alpha^*$  – constante de proporcionalidade com base em simulações no modelo computacional[-]
- $\alpha_{s,b}$  – coeficiente de erosão [ $m^{2-\beta} s^{\beta-1}$ ]
- $\alpha_I$  – coeficiente relacionado com a vazão da brecha
- $\alpha_2$  – coeficiente de erosão
- $\beta_{s,b}$  - expoente de erosão do fundo da brecha [-]
- $\beta_{s,m}$  - expoente de erosão das margens da brecha [-]
- $\beta_I$  – coeficiente relacionado com a vazão da brecha
- $\Delta V_R$  – variação de volume na albufeira [ $m^3$ ].
- $\Delta N_R$  – descida total do nível da albufeira [m]
- $\lambda_R$  – coeficiente dinâmico da albufeira [ $m^{-2}$ ]
- $\rho$  – porosidade [-]
- $\rho_N$  – expoente de evolução do fundo da brecha (normalmente tomado igual a 1, evolução linear) [-]

$\rho_W$  - expoente de evolução da largura da brecha (normalmente tomado igual a 1, evolução linear) [-]

$\eta$  - parâmetro adimensional de Walder e O'Connor (1997) [-]

$\mu$  - parâmetro adimensional proposto para a classificação de albufeiras com base em expressões calculadas analiticamente [-]

$\mu^*$  - parâmetro adimensional proposto para a classificação de albufeiras com base em simulações no modelo computacional [-]

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Gerais

A presença de uma barragem num vale constitui um factor de risco devido à possibilidade de ruptura, que se traduz na libertação do volume de água por esta abrangido que será libertado, provocando cheias a jusante desta e que podem constituir eventos catastróficos que podem conduzir a perdas consideráveis de vidas humanas e de bens materiais.

Mesmo considerando que a probabilidade de ruptura é relativamente baixa, a hipótese de se verificar uma cheia resultante de um acidente numa barragem com consequências catastróficas, faz com que os organismos responsáveis pela segurança e protecção civil e a comunidade técnico-científica se debrucem, sobre o problema relacionado com este tipo de acidente no sentido de estudar e planear soluções de prevenção e atenuação dos seus efeitos.

Neste sentido destacam-se as acções sistemáticas levadas a cabo pelo *International Committee On Large Dams* (ICOLD), para aprofundar o conhecimento sobre a ruptura de barragens, baseadas em dados recolhidos em diversos casos conhecidos de acidentes ocorridos em todo o mundo e também na preparação de recomendações e critérios de projecto com o objectivo de melhorar a segurança das barragens e dos vales a jusante.

Uma tarefa essencial para a caracterização da cheia induzida por um acidente do tipo ruptura de barragem é a modelação hidrodinâmica e simulação computacional da mesma. É com base nos resultados obtidos através da simulação que se elaboram os mapas de inundação e de zonamento e as cartas de risco de forma a ser feito o estudo das consequências e das medidas de prevenção a tomar em caso de acidente.

Inundações derivadas de rupturas de barragens naturais e construídas, constituem um perigo geral para as pessoas e bens materiais, em parte devido a rapidez e imprevisibilidade da ruptura de barragens de todo o tipo. Além disso, as barragens naturais podem-se formar rápida e imprevisivelmente, constituindo um perigo que deve ser rapidamente avaliado (Tsakiris, et al., 2010).

O RoDaB é um modelo computacional, simplificado, para a simulação de ruptura por galgamento de barragens em aterro que foi inicialmente concebido para ser aplicado a barragens de enrocamento (Franca e Almeida, 2004), tendo sido posteriormente adaptado para qualquer tipo de barragem em aterro. O modelo é baseado numa metodologia simples de esvaziamento de albufeira, tendo como condição fronteira de jusante a vazão na brecha que, por sua vez, é dependente da erosão do corpo da barragem.

## 1.2 Enquadramento Legal

O crescente número de acidentes com obras de engenharia que se têm verificado ao longo do tempo, por vezes com consequências catastróficas, levam a uma tomada de atitude por parte dos organismos oficiais no nosso país com vista à prevenção de acidentes e à preservação das obras existentes.

O Instituto da Água é a autoridade, estabelecida pelo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), com competências para o controlo na aplicação dos normativos de segurança de barragens, em todas as vertentes e fases da vida destas obras. ([www.inag.pt](http://www.inag.pt))

Como forma de garantir a segurança e qualidade durante as fases de projecto, construção, exploração, observação e inspecção, a legislação portuguesa dispõe da seguinte regulamentação:

- REGULAMENTO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (RSB) - Dec. Lei 344/2007, de 15 de Outubro de 2007
- NORMAS DE PROJECTO DE BARRAGENS - Portaria 846/93, de 10.09.1993
- NORMAS DE OBSERVAÇÃO E INSPECÇÃO DE BARRAGENS - Portaria 847/93, de 10.09.1993
- NORMAS DE CONSTRUÇÃO - Portaria 246/98, de 21.04.1998
- REGULAMENTO DE PEQUENAS BARRAGENS - Dec. Lei 409/93, de 14.12.1993

O presente Regulamento de Segurança e Barragens aplica-se:

- a) A todas as barragens de altura igual ou superior a 15 m, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até à cota do coroamento, ou a barragens de altura igual ou superior a 10 m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm<sup>3</sup>, no presente Regulamento designadas por grandes barragens;
- b) Às barragens de altura inferior a 15 m que não estejam incluídas na alínea anterior e cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 100 000 m<sup>3</sup>.

Estão ainda sujeitas às disposições do RSB outras barragens que, em resultado da aprovação de projectos ou de estudos de avaliação de segurança, sejam incluídas na Classe I definida de seguida.

De acordo com o RSB, as barragens agrupam-se em função dos danos potenciais a elas associados, nas classes a seguir indicadas por ordem decrescente da gravidade dos danos:

- Classe I;
- Classe II;
- Classe III.

A classificação referida deve ter em conta as vidas humanas, bens e ambiente associados à onda de inundação no vale a jusante.

Quadro 1.1 – Definição Classes RSB

Classe	Ocupação humana, bens e ambiente
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou Infra-estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens

Para as barragens de Classe I deve ser organizado o planeamento de Emergência. Qualquer barragem (pública ou privada) que em caso de ruptura ponha em perigo mais de 24 habitantes é obrigada a ter planeamento de emergência.



Uma novidade neste RSB é que distingue claramente que o planeamento de emergência é constituído pelo Plano de Emergência Interno e Plano Emergência Externo.

A elaboração do Plano de Emergência Interno (PEI) é da responsabilidade do dono de obra. Este é também responsável pelo aviso à população e alerta aos serviços e agentes da protecção civil, da conservação e manutenção dos sistemas de alerta e aviso considerados no PEI e na promoção de acções de sensibilização da população que devem ser articuladas com o INAG e protecção civil para a zona de intervenção do PEI.

Este documento é relativo à segurança da albufeira e do vale a jusante na zona de auto-salvamento (ZAS), zona esta definida pelo vale percorrido em 30 minutos pela onda de inundação, com um mínimo de 5 km.

A elaboração do Plano de Emergência Externo (PEE) é da responsabilidade da Protecção Civil. Esta é também responsável pela realização de exercícios ao plano, pela gestão das situações de emergência e aviso às populações fora da zona de auto-salvamento (ZAS) e pelas acções de sensibilização da população no âmbito do PEE.

De acordo com o RSB quem deve elaborar o PEE depende da abrangência administrativa do vale atingido, pela onda de inundação, como se indica seguidamente:

- Envolvendo um concelho → Câmara Municipal;
- Envolvendo dois ou mais concelhos → Comando Distrital de Operações de Socorro;
- Envolvendo concelhos de dois ou mais distritos → ANPC (Autoridade Nacional de Protecção Civil).

### **1.3 Objectivos**

A presente dissertação tem como primeiro objectivo encontrar uma metodologia que permita fazer uma avaliação rápida da perigosidade de um conjunto barragem/albufeira em caso de ruptura, com base num único parâmetro ( $\mu$ ). O cálculo de  $\mu$ , implica o conhecimento prévio de alguns factores característicos da barragem em estudo. Esse parâmetro permite avaliar se estamos perante uma albufeira grande/erosão rápida ou perante uma albufeira pequena/erosão lenta.

Este trabalho tem como segundo objectivo encontrar uma metodologia para a estimativa do caudal máximo de uma barragem em estudo, após ruptura da mesma, recorrendo a hidrogramas adimensionais, parametrizados por variáveis geométricas. O trabalho tem como base os resultados de simulações sistemáticas realizadas com um modelo de ruptura e através destes se propõem expressões para a classificação de albufeiras e caudal máximo efluente pela brecha.

### **1.4 Conteúdo da Dissertação**

Em seguida descreve-se a organização da dissertação, que se apresenta dividida em 6 capítulos, tendo em vista a concretização dos objectivos propostos.

Neste primeiro capítulo, é feita uma breve introdução ao tema de ruptura de barragens, seguido de uma apresentação de regulamentos aplicados em Portugal, terminando com uma breve descrição dos objectivos desta dissertação.

No segundo capítulo são apresentados os vários estudos sobre as causas e mecanismos de ruptura de barragens de aterro e enrocamento realizados por diversos autores. São também apresentados alguns modelos de simulação de brechas apresentados por vários autores. É explicada a classificação de albufeiras com base nos conceitos de “grande” e “pequena” albufeira e por fim apresenta-se uma primeira abordagem da previsão do caudal efluente.

No terceiro capítulo apresenta-se o modelo computacional RoDaB, as formulações matemáticas que permitem o estudo da ruptura de uma barragem, em que modelos de desenvolvimento da brecha se baseia, bem como a explicação de cada um deles, e o método de realização da simulação da ruptura de uma barragem.

No quarto capítulo são apresentadas as propostas de classificação de barragens bem como a proposta de cálculo do caudal efluente máximo estimado. Inicia-se o processo pela escolha do modelo de desenvolvimento da brecha, e por algumas simplificações de evolução da brecha adoptadas. São apresentados os dados em que foi baseado este estudo bem como os resultados das simulações efectuadas no modelo computacional RoDaB.

No quinto capítulo são aplicadas as propostas de parametrização, estudadas no capítulo anterior, a cinco barragens escolhidas. Inicia-se com uma apresentação breve das barragens que foram estudadas, seguido da sua respectiva classificação e apresentação de uma previsão do caudal máximo efluente.

No sexto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas na realização deste trabalho, assim como algumas propostas para o desenvolvimento futuro nesta matéria.

## 2 Revisão Bibliográfica sobre Ruptura de Barragens

### 2.1 Considerações Gerais

Nas últimas décadas a modelação do processo de ruptura de barragens tem sido um assunto explorado pela comunidade científica, com vista a desenvolver modelos, cada vez mais fiáveis, que reproduzam as condições hidráulicas resultantes de um acidente deste tipo.

De facto, as características hidráulicas da ruptura de uma barragem constituem a condição de montante de todo o processo de modelação da cheia induzida no vale a jusante.

### 2.2 Causas e Mecanismos de Rupturas em Barragens

O Quadro 2.1 constitui um resumo das causas de ruptura que podemos ter em função do tipo de barragem e foi compilado com base nas seguintes referências: Almeida (2001), CADAM (2000); Visser (1998) e Singh (1996).

Quadro 2.1 - Causas da ruptura de barragens, segundo em Johnson e Illes (1976) e em Singh (1996).

Tipo de barragem	Causa de ruptura
Betão de gravidade	Deterioração dos materiais de construção
	Problemas na fundação
	Instabilidade do corpo da estrutura
	Actos de Guerra
Betão em arco	Falha dos encontros laterais do vale onde se encontra fundada a barragem
	Carga excessiva resultante de um enchimento excessivo da albufeira
	Deslizamento do corpo da barragem
	Problemas na fundação
Aterro	Galgamento
	Erosão interna do corpo e da fundação
	Problemas na fundação
	Acção de ondas da albufeira

Diversas são as causas que podem levar à ruptura de uma barragem podendo um acidente ocorrer devido a um factor isolado ou a um conjunto de factores combinados.

Segundo Serafim (1981), as principais causas de ruptura de barragens de aterro são o galgamento (em geral devido à ocorrência de cheias excepcionais ou a falha dos mecanismos de abertura de comportas), que corresponde a cerca de um terço do total dos desastres, a erosão interna (fenómenos de *piping* ou *uplifting*) que corresponde a outro terço e ainda a inadequação das fundações, sismos, falta de capacidade resistente dos materiais, erros de projecto e de construção, como sendo as restantes causas responsáveis pela ruptura de barragens.

Biswas e Chatterjee (1971) apresentam como principais causas de ruptura de barragens o galgamento por insuficiente capacidade de vazão do descarregador de cheias (35%) e problemas na fundação (25%), tais como pressão interna, escorregamentos, não estanquidade das fundações, sobrepressões no paramento de jusante e assentamentos. Os restantes 40% dizem respeito a várias outras causas onde se incluem erros de construção e de projecto, má exploração da albufeira, falta de qualidade dos materiais, acção de ondas e actos de guerra, entre outros.

De entre os diversos tipos de barragem, as de aterro são as mais susceptíveis à ruptura pela maior susceptibilidade dos materiais à erosão (solos e enrocamentos) e pelo menor controlo de qualidade dos mesmos (grande heterogeneidade do material). Para uma barragem de betão o galgamento pode não constituir um perigo para a respectiva integridade estrutural, enquanto que para barragens de aterro esta ocorrência significa provavelmente a sua ruptura, parcial ou total (Franca, 2002).

Foster et al. (2000) realizaram uma análise exaustiva de rupturas em barragens de aterro concluindo que os modos de ruptura mais comuns são a erosão interna (48%) e o galgamento (46%).

Johnson e Illes (1976) apresentam uma descrição dos vários tipos de ruptura, relacionando cada tipo de barragem (aterro, betão-gravidade e betão em arco) com a forma de ruptura mais comum. Também Singh (1996) apresenta um resumo com as causas de ruptura ligadas a cada um destes três tipos de barragens.

Stateler (1997) define três tipos de condições para se dar a ruptura de barragens:

- condições relacionadas com cargas estáticas (exploração regular da albufeira em que a água se encontra com velocidade nula ou quase nula);
- condições relacionadas com cargas dinâmicas (ocorrência de um sismo);
- condições de cheia (ocorrência de cheias com deficiente evacuação).

De acordo com Lorenzo e Macchione (2010) o caudal efluente causado pela ruptura de uma barragem de aterro é um fenómeno gradual fortemente influenciado pela interacção entre o caudal e a barragem. Portanto a hipótese de uma ruptura instantânea da estrutura que compõe a barragem, que é correcta para as barragens de betão, é irrealista e demasiado pessimista para barragens de aterro. Portanto, vários métodos de proposta da previsão do caudal efluente máximo ou do hidrograma completo e dos parâmetros da brecha, foram apresentados.

Se a ruptura é quase instantânea (ruptura típica de barragens de betão) forma-se uma onda de frente abrupta (*shock wave*) com propagação para jusante, com velocidades e alturas de água muito superiores ao escoamento de base da linha de água. A ruptura quase instantânea provoca uma libertação súbita de água da albufeira e o consequente abaixamento do nível de água, originando uma onda negativa ou com propagação para montante (Franca, 2002).

No caso de rupturas graduais (ruptura típica de barragens de aterro) pode não ocorrer a formação de ondas de frente abrupta, sendo a cheia resultante gradual e progressiva, resultado de um lento processo de desenvolvimento da brecha, podendo variar de 15 minutos até cerca de 12 horas, tendo atingido, em alguns casos, 48 horas sem ter destruído a totalidade do corpo da barragem (Singh, 1996).

Os mecanismos de ruptura de uma barragem são variados dependendo do tipo de acção que provoca o acidente e do tipo de barragem em questão. A ruptura de barragens de aterro por galgamento ou por erosão interna são geralmente rupturas graduais, dependentes da capacidade de erosão do escoamento no aterro.

A brecha resultante de uma ruptura pode ser caracterizada de uma forma sumária pelos seguintes parâmetros: forma; ângulo dos taludes laterais; profundidade atingida; largura (sendo estes três últimos parâmetros geométricos relativos à configuração final da brecha); tempo de formação da brecha e caudal máximo descarregado.

O galgamento da barragem de aterro provoca a formação de uma brecha resultante da acção erosiva do escoamento sobre o corpo da barragem. Contudo uma má compactação do aterro que constitui o corpo da barragem ou em pontos onde esta possua material de pior qualidade, podendo ocorrer em qualquer ponto, também constitui um ponto fraco para originar a formação da brecha (Singh, 1996).

Segundo Johnson e Illes (1976), independentemente do local onde tenha o início, a brecha inicial apresenta a forma de “V”, três a quatro vezes mais larga do que profunda. Se a brecha atingir a base da barragem, supostamente não erodível, o vértice do “V” desaparece e a erosão procede lateralmente, ver Figura 2.1.

MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) analisaram as características de brechas em várias rupturas de barragens. Chegaram à conclusão que para barragens de aterro e sem ser de aterro, a forma da brecha pode ser triangular com 2V:1H de inclinação lateral. Continuando a evoluir a ruptura da barragem, a brecha atinge a base desta e assumirá uma forma trapezoidal se o material abaixo da fundação for não erodível, continuando a erosão a ocorrer nas paredes laterais da brecha.

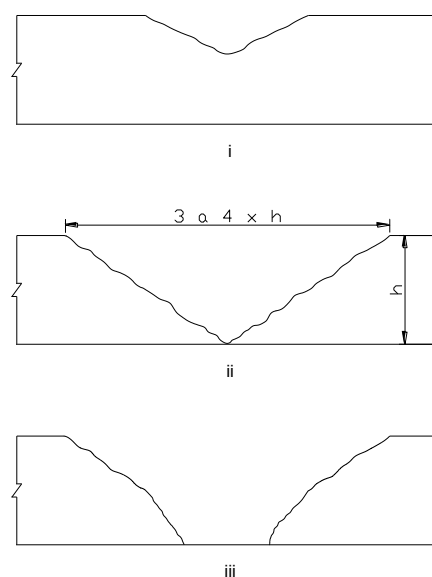


Figura 2.1 - Evolução da brecha provocada por galgamento numa barragem de aterro (Johnson e Illes, 1976) (i – brecha inicial; ii – a brecha atinge a base da barragem com a sua forma de “V”; iii – verificação de erosão lateral).

Powledge, et al. (1988) identificam três zonas de erosão sobre o talude de jusante, ou sobre a brecha, quando ocorre o galgamento de uma barragem de aterro tal como ilustra Figura 2.2.

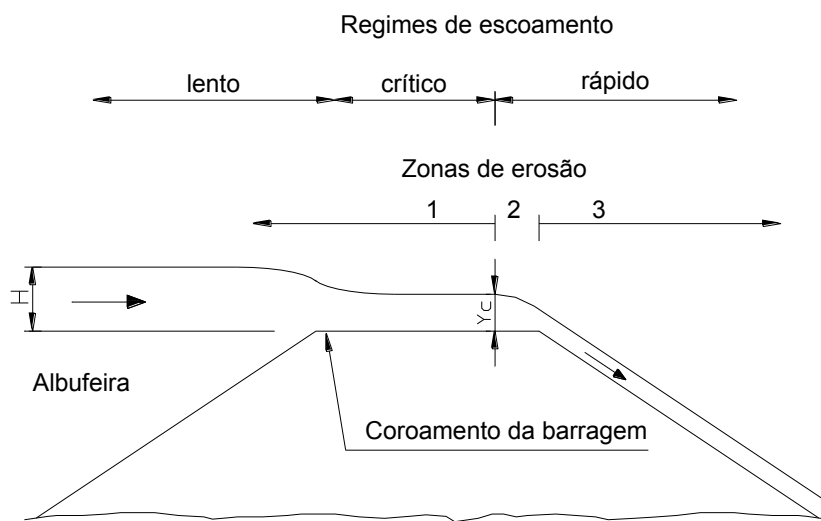


Figura 2.2 - Zonas de regime de escoamento e zonas de erosão durante o galgamento de uma barragem de aterro - adaptado de Powledge et al (1988): Zona 1 – Fraca tensão de arrastamento; Zona 2 – Tensão de arrastamento elevada; Zona 3 – Tensão de arrastamento muito elevada com elevado potencial erosivo.

Quando a capacidade de erosão do escoamento sobre a barragem é baixa, ou quase nula, a brecha tende a atingir um estado de equilíbrio, funcionando como um simples descarregador. Os efeitos causados pela erosão dependem do material constituinte do corpo da barragem bem como da respectiva compactação, da geometria desta, da localização do elemento impermeável, da geometria da albufeira, do volume inicial de água armazenado, da duração do galgamento, da qualidade dos materiais e da qualidade dos aterros (Franca, 2002).

Segundo Singh (1996) e Franca (2002) a extensão dos danos causados por um galgamento de uma barragem de aterro depende muito da duração dessa ocorrência, das propriedades e da qualidade de construção da barragem e da altura de água sobre o coroamento na altura do galgamento, intrinsecamente ligada ao caudal específico verificado.

### 2.3 Modelos de Simulação de Brechas

Os primeiros estudos foram feitos por Johnson e Illes (1976) que publicaram a classificação das configurações das brechas de barragens de aterro, gravidade e em arco. O Quadro 2.2 resume as relações propostas por diversos autores para os parâmetros da brecha (ex: geometria, tempo de formação). Para as barragens de aterro, a geometria da brecha é descrita de triangular a trapezoidal à medida que esta evolui. A maioria das configurações das brechas de barragens de aterro é considerada como trapezoidal.

Quadro 2.2 - Parametrização de brechas de barragens baseados em casos reais de rupturas (Singh, 1996)

Referências	Número de casos estudados	Relações propostas (Unidades S.I., metros, m <sup>3</sup> /s, horas)
Johnson e Illes (1976)		$0.5 h_D \leq B \leq 3 h_D$ para barragens de aterro
Singh e Snorrason (1982,1984)	20	$2 h_D \leq B \leq 5 h_D$ $0,15 \text{ m} \leq d_{ovtop} \leq 0,61 \text{ m}$ $0,25 \leq t_f \leq 1,0$
MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	42	Barragens de aterro: $V_{er} = 0,0261 (V_{out} \times h_W)^{0,769}$ (boa aproximação) $t_f = 0,0179 (V_{er})^{0,364}$ (valor em excesso) Outras barragens: $V_{er} = 0,00348 (V_{out} \times h_W)^{0,852}$ (boa aproximação)
FERC (1987)		$B$ normalmente 2-4 vezes $h_D$ $B$ pode variar entre 1-5 vezes $h_D$ $Z = 0,25$ a $1$ (projectadas, barragens compactadas) $Z = 1$ a $2$ (não projectadas, barragens de escória e carvão) $t_f = 0,1$ -1 horas (projectadas, barragens compactadas de aterro) $t_f = 0,1$ -0,5 horas (não projectadas, pouco compactadas)
Froehlich (1987)	43	$\bar{B}^* = 0,47 K_0 (S^*)^{0,25}$ $K_0 = 1,4$ galgamento; 1,0 outros casos $Z = 0,75 K_C (h_W^*)^{1,57} (\bar{W}^*)^{0,73}$ $K_C = 0,6$ com revestimento no paramento; 1,0 sem revestimento $t_f^* = 79 (S^*)^{0,47}$
Reclamation (1988)		$B = (3) h_W$ $t_f = (0.011)B$
Singh e Scarlatos (1988)	52	Propostas da geometria da brecha e da duração da ruptura
Von Thun e Gillette (1990)	57	$B_{topo}/B_{fundo}$ aproximadamente 1,29 Estimativas para $B$ , $Z$ , $t_f$

Quadro 2.3 - Parametrização de brechas de barragens baseados em casos reais de rupturas (Singh, 1996)  
(continuação)

Referências	Número de casos estudados	Relações propostas (Unidades S.I., metros, m <sup>3</sup> /s, horas)
Dewey e Gillette (1993)	57	Modelo do início da brecha; Estimativas para $B, Z, t_f$
Froehlich (1995b)	63	$\bar{B} = 0,1803 K_0 V_W^{0,32} h_b^{0,19}$ $t_f = 0,00254 V_W^{0,53} h_b^{-0,90}$ <p><math>K_0=1,4</math> para galgamento; 1,0 para outros casos</p>

Onde,

$B$  - largura da brecha (geral);

$\bar{B}$  - largura média da brecha  $(B_{topo}+B_{fundo})/2$ ;

$\bar{B}^*$  - largura média da brecha adimensional  $(\bar{B}/h_b)$ ;

$h_b$  - altura da brecha;

$h_D$  - altura da barragem;

$h_W$  - altura de água na ruptura, acima do fundo da brecha;

$h_W^*$  - altura de água na ruptura, acima do fundo da brecha, adimensional;

$d_{ovtop}$  - altura de galgamento na ruptura;

$K_C$  - factor de correcção da parede do núcleo (0,6 se a barragem contém parede do núcleo; 1,0 para outros casos);

$K_0$  - factor de correcção do galgamento (1,4 se a ruptura for por galgamento; 1,0 para outros casos);

$Q_P$  - caudal efluente máximo da brecha;

$V$  - volume da albufeira;

$S^*$  - volume da albufeira adimensional  $(V/h_b^3)$ ;

$t_f$  - tempo de formação da brecha (em horas);

$t_f^*$  - tempo de formação da brecha adimensional,  $t_f / \sqrt{gh_b}$  ( $t_f$ ,  $g$  e  $h_b$  têm que estar nas unidades que resultem num  $t_f^*$  adimensional.)

$V_{er}$  - volume de material erodido do corpo da barragem;

$V_{out}$  - volume de água efluente pela brecha (Volume da albufeira + Volume do caudal afluente durante a ruptura);

$\bar{W}^*$  - largura média da barragem adimensional  $(W_{coroamento}+W_{fundo})/(2h_b)$ ;

$Z$  - factor de inclinação da parede lateral da brecha ( $Z$  horizontal:1 Vertical)



Singh e Snorrason (1982) apresentaram as primeiras propostas da largura da brecha, estudaram a ruptura de 20 barragens, onde relacionaram a largura da brecha com a altura da barragem e chegaram à conclusão que a largura da brecha é geralmente igual a 2-5 vezes a altura da barragem. Em relação à duração da ruptura, desde o início até à geometria final da brecha varia normalmente entre 15 minutos a 1 hora. Também concluíram que, para rupturas de barragens por galgamento, a altura máxima de galgamento antes da ruptura está entre 0,15 e 0,61 metros.

MacDonald et al. (1984) propuseram um factor da formação da brecha, definido como o produto do volume de água efluente (incluindo o volume de água da albufeira e o volume de água afluente) com a altura de água medida a partir do topo da brecha no momento da ruptura. Relacionaram também o volume de material do aterro removido na ruptura com este factor, para barragens de aterro e para outras (por exemplo para as de enrocamento ou aterro com núcleo resistente à erosão). Os autores também afirmaram que, a partir da análise de 42 casos de estudo, a inclinação das paredes da brecha pode ser assumida como 1H:2V, na maioria dos casos, com uma geometria triangular ou trapezoidal, dependendo se a brecha atingia ou não a soleira da barragem. Foi também apresentada uma curva para o tempo de formação da brecha em função do volume de material erodido para as barragens de aterro, em relação a outro tipo de barragens, a duração da ruptura não é previsível, talvez porque em alguns casos a ruptura deve-se a instabilidades estruturais e não devido ao desenvolvimento da erosão ao longo da ruptura. Os autores também criaram uma abordagem interactiva para estimar os parâmetros da brecha simulando o caudal efluente pela brecha, usando o programa DAMBRK, referido no Quadro 2.4, e revendo os parâmetros da brecha estimados conforme necessário.

Froehlich (1987) desenvolveu equações adimensionais para estimar a largura média da brecha, o factor da inclinação média e o tempo de formação da brecha. As estimativas foram baseadas nas características da barragem, incluindo o volume do reservatório, a altura de água acima da base da brecha, a altura e largura da brecha, a largura do topo do coroamento, coeficientes para rupturas por galgamento e por outro tipo de rupturas, e a presença, ou não, de revestimento no paramento de montante da barragem. O autor também concluiu que as brechas criadas devido à ruptura por galgamento são normalmente maiores e a sua erosão lateral é mais rápida, comparando com outras brechas criadas por outros tipos de rupturas.

Froehlich reviu a sua análise feita em 1987 num artigo publicado em 1995, a partir da informação de 63 casos de estudo de rupturas. O autor desenvolveu novas equações de estimativas para a largura média da brecha e para o tempo de ruptura, a grande diferença para as suas relações feitas em 1987 foi as equações deixarem de ser adimensionais. Também sugeriu que o factor da inclinação lateral da brecha é igual a  $Z=1,4$  para rupturas por galgamento e  $Z=0,9$  para outras causas de rupturas. Após os 63 casos estudados o autor estimou que o factor médio da inclinação lateral média das brechas seria aproximadamente de 1,0.

USBR (1988) a partir de um modelo computacional com o nome de SMPDBK, estimou a largura final da brecha e o tempo de ruptura com o objectivo de serem usados em estudos de classificação de perigo em caso de ruptura. Os valores sugeridos não têm como objectivo a previsão precisa de caudais efluentes máximos, são antes, intencionalmente superiores ao resultado esperado, ou seja, são considerados valores conservativos, por forma a estar do lado da segurança no procedimento da classificação de perigo. Para as barragens de aterro, a largura média recomendada da brecha é igual a 3 vezes a sua profundidade. Em relação ao tempo de desenvolvimento da brecha (em horas) o autor recomenda que seja 0,011 vezes do valor da largura da brecha (em metros).

Singh e Scarlatos (1988) após estudarem 52 casos de ruptura de barragens, apresentaram estimativas da geometria da brecha e do tempo de ruptura. Os autores propuseram uma relação entre a largura do topo e do fundo da brecha,  $B_{topo}/B_{fundo}$  entre 1,06 e 1,74, com um valor médio de 1,29 e desvio padrão de 0,180. Em grande parte das simulações a inclinação das paredes laterais da brecha variou entre  $10^0$  e  $50^0$  em relação à vertical. No estudo das simulações das rupturas, a duração não excedeu, em grande parte dos casos, as 3 h e em mais de 50% o tempo da ruptura foi inferior a 1,5 h.

Von Thun e Gillette (1990) e Dewey e Gillette (1993) a partir de estudos anteriores de rupturas de barragens realizados por Froehlich (1987) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), desenvolveram estimativas para a inclinação das paredes das brechas, largura das brechas a meia altura da mesma e do tempo de ruptura. Os autores propuseram que a inclinação das paredes das brechas fosse de 1:1 excepto para barragens constituídas por paramentos coesivos ou núcleos coesivos com grande largura, onde as inclinações de 1:2 ou 1:3 (H:V) seriam mais apropriadas.

Em relação à largura média da brecha Von Thun e Gillette (1990) propuseram que esta fosse:

$$\bar{B} = 2,5h_w + C_B \quad (2.1)$$

onde  $h_w$  é a altura de água na albufeira no momento da ruptura e  $C_B$  uma variável de acordo com o volume do reservatório.

Quadro 2.4 - Relação entre o volume do reservatório e a variável  $C_B$ , para o cálculo da largura média da brecha (Von Thun e Gillette, 1990)

Volume do reservatório ( $m^3$ )	$C_B$ (metros)
$<1,23 \times 10^6$	6,1
$1,23 \times 10^6 - 6,17 \times 10^6$	18,3
$6,17 \times 10^6 - 1,23 \times 10^7$	42,7
$>1,23 \times 10^7$	54,9

Este método de calcular a largura da brecha é mais expedito do que a abordagem proposta por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), onde o volume de material erodido relaciona-se com a largura da brecha. Dependendo sempre das características da geometria de cada barragem, os autores nos seus estudos observaram que o limite superior de largura da brecha para grandes barragens de aterro é de 150 m.

Von Thun e Gillette (1990) também propuseram dois métodos de estimar o tempo de ruptura, a primeira expressão estima a duração de ruptura para barragens com erosão resistente e a segunda expressão estima para material com erosão rápida.

$$t_f = 0,020h_w + 0,25 \quad (2.2)$$

$$t_f = 0,015h_w \quad (2.3)$$

Onde  $t_f$  representa-se em horas e  $h_w$ , altura de água acima do topo da brecha, em metros.

Os autores também desenvolveram outra estimativa para o tempo de formação da brecha baseado na relação da erosão lateral média da brecha com a altura de água acima do topo da brecha; mais uma vez a primeira expressão apresentada de seguida é para barragens constituídas por material resistente à erosão e a seguinte para estruturas com erodibilidade elevada.

$$t_f = \frac{\bar{B}}{4h_W} \quad (2.4)$$

$$t_f = \frac{\bar{B}}{4h_W + 61} \quad (2.5)$$

Onde  $\bar{B}$  e  $h_W$  apresentam-se em metros.

De forma a clarificar o estudo de diversos autores, sobre rupturas de barragens e respectivas estimativas dos parâmetros da brecha e do caudal efluente máximo apresenta-se de seguida uma compilação de resultados no Quadro 2.4.

Quadro 2.5 - Compilações de estudos sobre rupturas de barragens e respectivas estimativas dos parâmetros da brecha e do caudal efluente máximo

Referências	Casos de estudo	Propostas	Notas
Babb e Mermel (1968)	>600 incidentes		Grande parte dos casos não estão bem documentados
Kirkpatrick (1977)	16 (mais 5 rupturas hipotéticas)	$Q_P = f(h_W)$	
SCS (1981)	13	$Q_P = f(h_W)$	
Hagen (1982)	6	$Q_P = f(h_W \times V)$	
Reclamation (1982)	21	$Q_P = f(h_W)$	
Graham (1983)	6		Barragens com grandes relações entre armazenamento e altura
Singh e Snorrason (1982,1984)	20 rupturas reais e 8 rupturas simuladas	Estimativas para $B$ , $d_{ovtop}$ e $t_f$ $Q_P = f(V)$ ; $Q_P = f(h_d)$	Estudo do $Q_P$ baseado nas simulações
Graham (sem data)	19	$Q_P = f(h_W, S)$	
MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	42	$V_{er} = f(V_{out} \times h_W)$ $t_f = f(V_{er})$ $Q_P = f(V_{out} \times h_W)$	
Costa (1985)	31 barragens construídas	$Q_P = f(h_d)$ $Q_P = f(V)$ $Q_P = f(h_d \times V)$	Inclui informação de rupturas reais de barragens
Evans (1986)		$Q_P = f(V_W)$	
FERC (1987)		Estimativas para $B, Z, t_f$	
Froehlich (1987)	43	Relações para $B, Z, t_f$	

Quadro 2.6 - Compilações de estudos sobre rupturas de barragens e respectivas estimativas dos parâmetros da brecha e do caudal efluente máximo (continuação)

Referências	Casos de estudo	Propostas	Notas
Reclamation (1988)		Estimativas para $B, t_f$	
Singh e Scarlatos (1988)	52	Estimativas para $B, Z, t_f$	
Von Thun e Gillette (1990)	57	Estimativas do $Z$ $B = f(h_W, V)$ $t_f = f(h_W, \text{resistência da erosão})$	
Froehlich (1995b)	63	Estimativas para $B, Z, t_f$	
Froehlich (1995a)	22	$Q_P = f(V_W, h_W)$	

Onde,

$Q_P$  - caudal efluente máximo da brecha;

$V$  – volume da albufeira;

Toda a informação sobre modelação de ruptura de barragens de aterro utilizada até este momento foi retirada da publicação Prediction of Embankment Dam Breach Parameters, editada por Wahl em 1998, da entidade Water Resources Research Laboratory.

Hoje em dia existem várias ferramentas disponíveis para analisar a ruptura de barragens e os respectivos hidrogramas de escoamento resultantes.

Segundo Wahl (1998) as duas principais tarefas na análise de uma brecha de uma barragem são a previsão do hidrograma de escoamento da albufeira e a propagação desse mesmo hidrograma através do vale a jusante. Prever o hidrograma de escoamento pode ser ainda subdividido em previsão das características da brecha (por exemplo, forma, profundidade, largura, taxa de formação de brecha) e o esvaziamento da albufeira e caudal através da brecha. Estas tarefas de esvaziamento – através da brecha e através do vale a jusante – são modeladas na maioria dos modelos computacionais usados, de forma unidimensional. Contudo, os programas diferem largamente no processo de tratamento da simulação da brecha. Muitos modelos não simulam directamente a brecha; em vez disso, o utilizador determina as características da brecha independentemente e fornece essa informação como entrada de dados no modelo de acompanhamento.

O caudal máximo ou hidrograma do caudal podem ser calculados utilizando diferentes abordagens (Broich, 1999):

- Empírica;
- Analítica;
- Paramétrica;
- Numérica.

Todas as abordagens, com exceção dos métodos empíricos, requerem certas considerações de hidráulica, transporte de sedimentos e formação da brecha. As condições hidrodinâmicas estão bem representadas pela teoria dos escoamentos com pouca profundidade. Assim, as maiores dificuldades acabam por se encontrar na escolha de uma fórmula de transporte de sedimentos com os parâmetros apropriados e a modelação dos processos erosivos do fundo e das margens da brecha. Para todos os modelos é necessário introduzir as considerações acerca do alargamento cinemático da brecha. Se o desenvolvimento da brecha é modelado de acordo com estimativas de mecânica de solos, então durante a simulação podem ocorrer colapsos súbitos. Isto é consistente com a natureza mas cria dificuldades matemáticas. Por vezes o desenvolvimento da brecha é apresentado como contínuo, apesar de se prever descontínuo. Os modelos numéricos tendem a utilizar menos pressupostos, em que a brecha é moldada de forma determinística e considerando o corpo da barragem homogêneo (Singh, 1996, Tingsanchali & Chinnarasri, 2001, Coleman et al., 2002, Franca & Almeida, 2004 e Wang & Bowles, 2006). De acordo com Hanson et al. (1999) e Wahl (2004), a maior fragilidade destes modelos é a não integração das componentes hidrodinâmica e geotécnica, nomeadamente no que diz respeito à instabilidade dos taludes da brecha.

O Quadro 2.5 constitui um resumo dos mais importantes avanços na modelação numérica da ruptura de barragens e foi elaborado com base nas seguintes referências: Almeida (2001), CADAM (2000b); Visser (1998) e Singh (1996).

Quadro 2.7 - Modelos de brecha baseado em Almeida (2001), CADAM (2000b), Visser (1998) e Singh (1996).

<b>Modelo</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Morfologia da brecha</b>	<b>Caudal efluente pela brecha</b>	<b>Transporte de sedimentos</b>	<b>Taludes laterais</b>
Cristofano	Cristofano 1965	Trapezoidal com largura de fundo constante	Equação de um descarregador	Fórmula empírica de Cristofano	-
Harris-Wagner (HW)	Harris-Wagner 1967	Parabólica com a largura do topo igual a 3,75 a altura	Equação de um descarregador	Fórmula Schoklitsh	-
BRDAM	Brown and Rogers 1977/1981	Parabólica com taludes laterais com 45° de inclinação	Equação de um descarregador	Fórmula Schoklitsh	Ruptura do limite superior acima do orifício resultante do piping
Ponce-Tsivoglou (PT)	Ponce-Tsivoglou 1981	Relação entre a largura do topo e o caudal escoado	Equações de Saint-Venant completas	Equação de Exner com Meyer-Peter-Muller	-

Quadro 2.8 - Modelos de brecha baseado em Almeida (2001), CADAM (2000b), Visser (1998) e Singh (1996) (continuação)

<b>Modelo</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Morfologia da brecha</b>	<b>Caudal efluente pela brecha</b>	<b>Transporte de sedimentos</b>	<b>Taludes laterais</b>
Lou	Wellington Lou 1981	Secção mais eficiente (secção em forma de coseno)	Equações de Saint-Venant completas	1 - Fórmula empírica de Cristofano 2 - Fórmula de Duboys e Einstein 3 - Fórmula de Lou	-
Nogueira	Nogueira 1984	Secção mais eficiente do ponto de vista da tensão tangencial (secção em forma de coseno)	Equações de Saint-Venant completas	Equação de Exner com Meyer-Peter-Muller	-
BREACH	Fread 1984	Rectangular e trapezoidal	Equação de um descarregador para galgamento e equação de um orifício para piping	Fórmula de Meyer-Peter-Muller modificada por SmartLouWellington	1 - Estabilidade dos taludes laterais da brecha 2 - Ruptura da limite superior acima do orifício resultante do piping, ou ruptura da camada superior em caso de galgamento
BEED	Singh et al 1986/1988 (Singh, 1996)	Trapezoidal	Equação de um descarregador	Fórmula de Einstein-Brown	Estabilidade dos taludes laterais da brecha

Quadro 2.9 - Modelos de brecha baseado em Almeida (2001), CADAM (2000b), Visser (1998) e Singh (1996) (continuação)

<b>Modelo</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Morfologia da brecha</b>	<b>Caudal efluente pela brecha</b>	<b>Transporte de sedimentos</b>	<b>Taludes laterais</b>
Havnø	Havnø et al 1989	Trapezoidal	Equação de um descarregador	1 - Modelo de erosão linear 2 - Fórmula de Meyer-Peter-Muller 3 - Engelun-Hansen	-
Mojib	Mojib 1990	Rectangular, triangular e trapezoidal	Equação de um descarregador	1 - Fórmula de Du Boys 2 - Fórmula de Smart	-
Bechteler e Broich	Bechteler e Broich 1993	Variação da morfologia da brecha no tempo	Equação de um descarregador	1 - Fórmula de Meyer-Peter-Muller 2 - Fórmula de Cristofano 3 - Fórmula de Smart	-
Sites	NRCS (US) 1998	1- Ruptura da camada superficial 2 - Início da brecha 3 – Erosão	Princípios de hidrologia e de hidráulica para produzir a curva de vazão de um descarregador	Para a fase 1e 2 utilização de um modelo de remoção; para a fase 3 equação de dissipação de energia	Estabilidade de um canal de saída de um descarregador
NCP-BREACH	Coleman et al 1998	Parabólica	Fórmula empírica	Fórmula empírica	-
EDBREACH	Loukola e Huokuna 1998	Trapezoidal	Equação de um descarregador	Fórmula de Meyer-Peter-Muller	Ruptura do limite superior acima do orifício resultante do piping

Quadro 2.10 - Modelos de brecha baseado em Almeida (2001), CADAM (2000b), Visser (1998) e Singh (1996) (continuação)

<b>Modelo</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Morfologia da brecha</b>	<b>Caudal efluente pela brecha</b>	<b>Transporte de sedimentos</b>	<b>Taludes laterais</b>
BRES	Visser 1998	5 estágios de ruptura	Equação de um descarregador	1 - Bagnold-Visser 2 - Engelun-Hansen 3 - Van Rijn 4 - Wilson	-
DEICH_N2	Broich 1998	Resultante da solução da equação de Exner bi-dimensional	Equações de Saint-Venant completas e bi-dimensionais	1 - Meyer-Peter-Muller (arrastamento) 2 - Engelun-Hansen (suspensão) 3 - Bagnold (total) 4 - Smart (arrastamento) 5 - Smart / Bagnold (combinado) 6 - Zanke / Bagnold (combinado) 7 - Meyer-Peter-Muller / Bagnold (combinado) 8 - Engelun-Hansen (arrastamento) 9 - Smart / Bagnold (combinado para material não uniforme)	-
HR BREACH	Mohamed 1999	Instabilidade dos taludes laterais e erosão contínua	Equação de um descarregador	Fórmula de Yang (para material não coesivo)	Método detalhado para a instabilidade dos taludes laterais
RoDaB	Franca e Almeida 2004	Configuração resultante da equação Exner modificada	Equação de um descarregador	Fórmula empírica	Evolução contínua



## 2.4 Classificação de Albufeiras

### 2.4.1 Parametrização de Walder e O'Connor

O conceito de “grande” albufeira/erosão rápida e “pequena” albufeira/erosão lenta descrito em Walder e O'Connor (1997) e Wahl (2001) tem como base a sensibilidade do caudal máximo efluente pela brecha às taxas de erosão do fundo desta e da descida do nível da albufeira. Os referidos autores introduzem um parâmetro adimensional para classificação do tipo de situação. Franca e Almeida (2004) introduziram uma parametrização diferente, sendo esta a base do desenvolvimento do presente trabalho.

### 2.4.2 Albufeira Grande

Considere-se uma albufeira com um volume tendendo para “infinito” em que a variação de volume no tempo não produz uma variação sensível no nível do plano de água ( $N_R$ ):

$$\frac{dN_R(t)}{dt} = 0 \quad (2.6)$$

Neste caso, o caudal é máximo quando a taxa de erosão do fundo for nula, ou seja quando a brecha atinge o seu valor de cota de soleira mínima (ou cota do fundo do leito do rio) e o processo de desenvolvimento desta se interrompe, dando lugar a um regime permanente em que o valor do caudal de ponta efluente não é influenciado pela taxa de abaixamento da brecha nem pelo valor do volume total da albufeira mas apenas pela geometria final da brecha. De facto, sendo o nível na albufeira hipoteticamente constante, este instante corresponde a uma situação de carga máxima sobre a soleira da brecha. (Fig. 2.3)

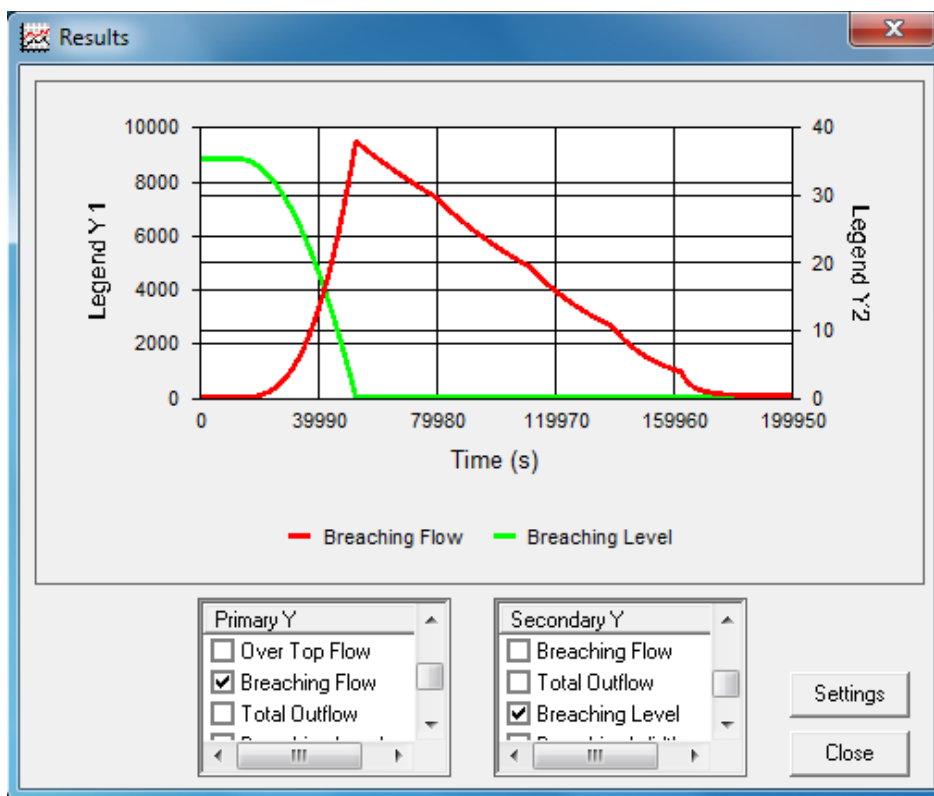


Figura 2.3 - Exemplo da variação no tempo do caudal em função da cota de soleira da brecha – albufeira “grande” (janela de visualização do programa RoDaB)

Em albufeiras “grandes” o caudal máximo atinge valores bastante elevados e ocorre quando a brecha atinge a sua cota mínima, ou cota do leito do rio e a largura máxima que de modo simplificado pode ser considerado a largura do vale.

### 2.4.3 Albufeira Pequena

Ao contrário do que acontece no caso anterior, numa albufeira de “pequenas” dimensões a resposta dinâmica desta é relativamente rápida, ou seja, o nível de água é bastante sensível a qualquer variação no volume armazenado. Numa albufeira “pequena” tem-se:

$$\left| \frac{dN_R(t)}{dt} \right| \rightarrow \infty \quad (2.7)$$

Uma albufeira pequena implica uma taxa de erosão também relativamente elevada.

Enquanto na classe de albufeiras “grandes” o caudal máximo tende a ser unicamente função da carga máxima (profundidade máxima da brecha) e da geometria da brecha, na classe de albufeiras “pequenas” o caudal máximo depende da razão entre as taxas de variação do nível da albufeira e de erosão da brecha durante o desenvolvimento desta (Walder e O'Connor, 1997). O caudal máximo efluente passa a ser também função da área transversal da albufeira e da carga hidráulica máxima sobre a soleira da brecha ou seja, indirectamente do volume da albufeira. Neste caso, o pico do hidrograma efluente ocorre antes da brecha atingir a cota mínima.

Os resultados da Figura 2.4 são de uma simulação virtual correspondente a uma albufeira pequena.

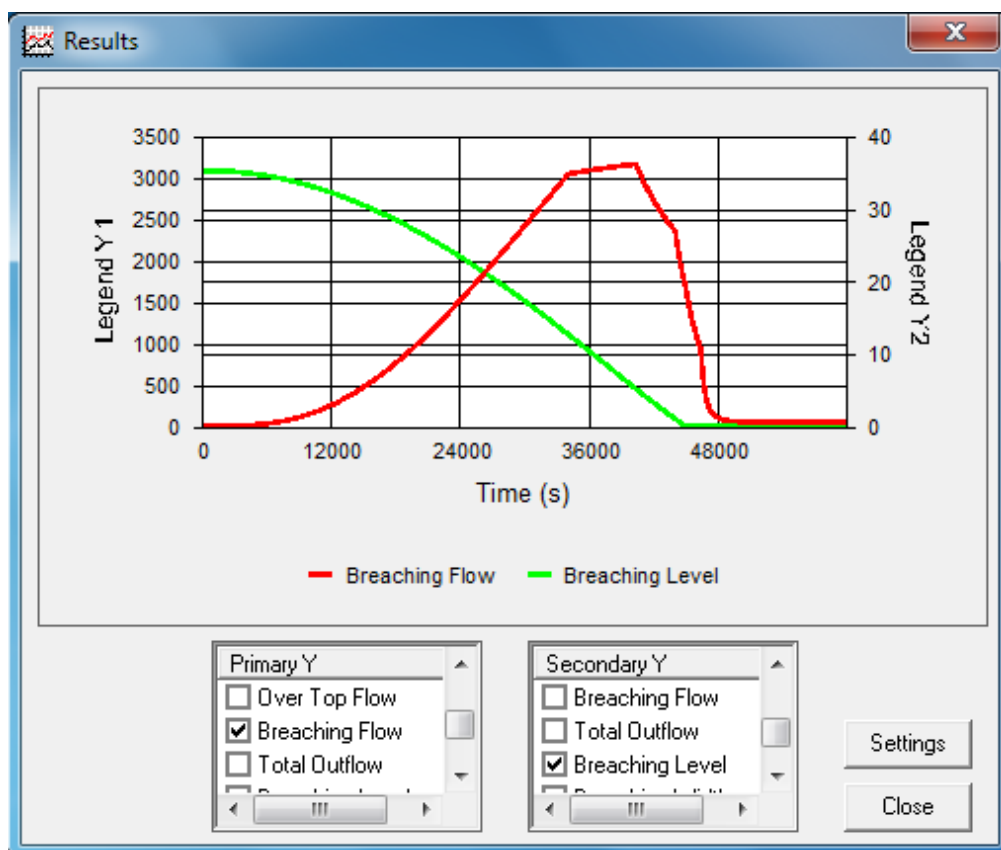


Figura 2.4 - Exemplo da variação no tempo do caudal em função da cota de soleira da brecha – albufeira “pequena” (janela de visualização do programa RoDaB)

A designação de “grande” ou “pequena” albufeira não se relaciona com o volume absoluto desta mas com a relação entre a respectiva resposta dinâmica e a taxa de erosão na brecha.

## 2.5 Previsão do Caudal Efluente

Para além do caudal efluente pela brecha podem ainda existir mais perdas de volume, nomeadamente descargas de superfície ou de fundo e tomadas de água. A expressão geral do comportamento dinâmico da albufeira (conservação de massa), para um determinado intervalo de tempo, pode ser escrita com a seguinte forma:

$$V_a - V_0^l - V_0 = \Delta V_R \quad (2.8)$$

onde:

$V_a$  – volume afluente à albufeira resultante do hidrograma de cheia [ $\text{m}^3$ ];

$V_0^l$  – volume efluente da albufeira com destino a sumidouros “laterais” [ $\text{m}^3$ ];

$V_0$  – volume efluente da albufeira através da brecha e por galgamento da barragem [ $\text{m}^3$ ];

$\Delta V_R$  – variação de volume na albufeira [ $\text{m}^3$ ].

O volume efluente total da albufeira é a soma do volume efluente pela brecha com o volume efluente por galgamento do coroamento da barragem:

$$V_0 = V_B + V_C \quad (2.9)$$

onde:

$V_B$  – volume efluente da albufeira através da brecha [ $\text{m}^3$ ];

$V_C$  – volume efluente da albufeira por galgamento do coroamento da barragem [ $\text{m}^3$ ].

O caudal efluente ( $Q_0$ ) da albufeira através da brecha e por galgamento do coroamento da barragem é a soma destas duas parcelas:

$$Q_0 = Q_B + Q_C \quad (2.10)$$

onde:

$Q_B$  – caudal efluente através da brecha [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ];

$Q_C$  – caudal efluente por galgamento do coroamento [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ].

O objectivo do desenvolvimento posterior será na estimação da parcela  $Q_B$ .



### 3 Modelo RoDaB

#### 3.1 Considerações Gerais

Este sub-capítulo foi baseado na descrição do modelo RoDaB (Rockfill Dam Breaching) patente em Franca e Almeida (2004) e Franca, et al. (2004).

O modelo RoDaB é baseado num esquema de esvaziamento de albufeira tendo o hidrograma de cheia como condição fronteira de montante e o caudal efluente pela brecha e por galgamento do coroamento como condição fronteira do vale a jusante. O modelo assume as seguintes hipóteses:

1. A ruptura da barragem é parcial e gradual, o que permite não considerar os efeitos de inércia e de ondulação no nível da albufeira e da carga hidráulica devido à propagação da onda de superfície na albufeira.
2. A ruptura é induzida pelo galgamento do coroamento e efeitos locais, causados pela instabilidade dos taludes ou pela erosão interna devido ao caudal de percolação, não são directamente considerados. Efeitos de infiltração que são induzidos pelo galgamento que infiltra pelo coroamento do talude, são globalmente considerados no comportamento experimental da barragem.
3. Os efeitos de água estagnada a jusante não afectam a vazão na brecha.

O RoDaB (Franca & Almeida, 2004), inicialmente concebido para simular rupturas de barragens de enrocamento por galgamento, é um modelo computacional simplificado para a simulação da evolução de brechas em barragens de aterro, calculadas na secção de controlo do escoamento. Tem como resultado um hidrograma de cheia consistente e contínuo, apropriado para a utilização em modelos de propagação de cheias nos vales a jusante de barragens. É baseado numa simples metodologia de esvaziamento de albufeira tendo a particularidade de permitir o cálculo da evolução da brecha da barragem através de três modelos distintos:

1. Modelo Empírico - que implica o conhecimento *à priori* dos parâmetros da brecha (geometria final da brecha, tempo de formação da brecha e expoente de erosão da brecha),
2. Modelo Semi-empírico – onde a geometria final da brecha ainda é necessária mas a evolução da brecha é controlada pelas características de erosão do material da barragem, usando a equação de erosão de Exner (Exner, 1925),
3. Modelo Racional – onde a evolução da brecha é completamente regulada pelas características de erosão do material da barragem, usando também a equação de Exner.

O modelo computacional RoDaB possui uma interface simples e atractiva em ambiente de janelas e tem sido utilizado na modelação de ruptura de barragens de aterro tanto em trabalho de investigação como de engenharia prática, nomeadamente na estimação do hidrograma efluente em caso de ruptura da barragem de Odelouca, situada no Algarve, no âmbito do seu Plano de Emergência Interno, aprovado em 2009 (Franca et al., 2011).

### 3.2 Esvaziamento da Albufeira

#### 3.2.1 Equação de Continuidade

A simulação da albufeira é realizada a partir de um modelo de balanço de volumes, baseado na equação da continuidade ou de conservação de massa, em que se admite que a superfície livre se mantém horizontal.

$$Q_i - Q_B - Q_c = \frac{dV_R}{dt} \quad (3.1)$$

em que:

$Q_i$  – caudal afluente à albufeira resultante do hidrograma de cheia ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ );

$Q_B$  – caudal efluente através da brecha ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ );

$Q_c$  – caudal efluente por galgamento do coroamento ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ );

$V_R$  – Volume na albufeira ( $\text{m}^3$ );

$t$  – variável tempo (s).

O caudal efluente devido a dispositivos como turbinas e descarregadores de cheias não é introduzido no RoDaB, podendo, a ausência destes caudais, negligenciar o resultado se comparado com o caudal efluente através da brecha e por galgamento (Garcia, 2011).

A variação do nível da albufeira está directamente relacionada com a variação de volume armazenado, através da curva de volumes da albufeira e, usualmente, esta relação é expressa em termos de uma constante intitulada coeficiente dinâmico ou coeficiente de resposta dinâmica da albufeira  $\lambda_R$ . Este coeficiente dinâmico quantifica a rapidez de resposta da albufeira, no que respeita à descida do nível de água, a variações de volume impostas nas fronteiras da albufeira, e é determinado entre cada dois pontos da curva de volumes. A equação anterior toma então a seguinte forma:

$$\lambda_R(Q_i - Q_B - Q_c) = \frac{dN_R}{dt} \quad (3.2)$$

em que:

$N_R$  – nível de água na albufeira (m);

$\lambda_R$  – coeficiente dinâmico da albufeira ( $\text{m}^{-2}$ ).

O coeficiente dinâmico da albufeira corresponde ao inverso da área de referência (superfície) da albufeira.

### 3.2.2 Caudal Efluente por Galgamento do Coroamento

Para o cálculo do caudal sobre o coroamento é adoptada uma equação de vazão de soleiras descarregadoras:

$$Q_C = C_c L'_c (\sqrt{2g})(N_R - N_C)^{1,5} \quad (3.3)$$

onde,

$C_C$  – coeficiente de vazão do coroamento da barragem (-);

$L'_C$  – comprimento do coroamento galgado (m);

$g$  – aceleração gravítica ( $\text{ms}^{-2}$ );

$N_C$  – cota do nível do coroamento (m);

$N_R$  – cota do nível da albufeira (m).

Esta formulação é consistente com a hipótese de se desprezarem os efeitos inerciais nomeadamente os decorrentes da propagação de ondas na albufeira provocadas pela abertura “rápida” de uma brecha. Só existe galgamento da água da albufeira se o valor da cota da albufeira for superior à cota do coroamento na zona onde está a ocorrer o galgamento.

As barragens de enrocamento tendem a ser mais estáveis e resistentes ao galgamento em comparação com as de aterro (Stephenson, 1979). Numa estrutura de enrocamento o caudal referente ao galgamento pode atingir valores relativamente elevados sem que ocorra o início da ruptura (Franca & Almeida, 2004).

Para o cálculo do coeficiente de vazão sobre o coroamento, em barragens de enrocamento, pode ser utilizada como opção a um valor constante definido no RoDaB, uma expressão apresentada por Martins (1981), em função da carga hidráulica sobre o coroamento e da respectiva largura:

$$C_C = 0,333 + 0,132 \left( \frac{N_R - N_C}{L_c} \right) \quad (3.4)$$

onde:

$L_C$  – largura do coroamento (m).

### 3.2.3 Caudal Efluente pela Brecha

Singh & Scarlatos (1988a) afirmaram, tendo em conta resultados experimentais, que o cálculo contínuo do caudal efluente pela brecha pode ser estimado recorrendo a uma equação de vazão de um descarregador:

$$Q_B = C_v W_B (N_R - N_B)^{1,5} \quad (3.5)$$

onde,

$C_v$  – coeficiente da brecha ( $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ ), ( $C_v = C \sqrt{2g}$ , sendo  $C$  o coeficiente de vazão de uma soleira normal);

$W_B$  – largura da brecha (m);

$N_B$  – cota do fundo da brecha (m).

Coleman et al. (1997), com base em resultados experimentais acerca do comportamento de barragens constituídas por material incoerente, sugeriu o valor de 1,3 para o coeficiente da expressão anterior. Sendo o coeficiente de vazão da brecha constante, o caudal que passa na brecha será apenas influenciado pela evolução da brecha e pela carga hidráulica.

A utilização da equação anterior para o cálculo da vazão na brecha presume um canal suficientemente largo para que se possa desprezar a vazão das zonas junto à parede da brecha, onde o expoente da carga hidráulica é normalmente diferente de 1,5.

SINGH (1996) sugere na descrição do modelo *BEED* que a vazão nas zonas junto às margens seja calculada em função da carga hidráulica levantada ao expoente 2,5.

### 3.3 Evolução da brecha

#### 3.3.1 Equação de Erosão

Para a estimativa da configuração da brecha, as abordagens racional e semi-empírica utilizam uma formulação analítica baseada na equação de Exner modificada. No programa RoDaB a equação de Exner (Exner, 1925) é utilizada na secção de controlo da brecha para a determinação da evolução do nível inferior da brecha. Graf & Altinakar (1998) propuseram um rearranjo da equação de Exner, considerando um intervalo unitário ( $\Delta x=1$ ); considera-se no modelo que a condição de fronteira a montante (correspondendo à albufeira) corresponde a um caudal sólido nulo. Sendo assim, a equação fica na forma descrita de seguida, onde o caudal sólido é calculado na secção da brecha como:

$$\frac{dN_B}{dt} + \frac{1}{1-\rho} q_{s,b} = 0 \quad (3.6)$$

em que:

$\rho$  – porosidade (-);

$q_{s,b}$  – caudal de material sólido da parte inferior da brecha por unidade de área ( $\text{ms}^{-1}$ );

$N_B$  – cota do fundo da brecha (m);

$t$  - tempo (s).

Graf e Altinakar (1998) propuseram que a descarga de material sólido fosse simplesmente calculada em função da velocidade média do caudal e de duas constantes de erosão:

$$q_{s,b} = \alpha_{s,b} \cdot U_B^{\beta_{s,b}} \quad (3.7)$$

em que:

$\alpha_{s,b}$  – coeficiente de erosão ( $\text{m}^{2-\beta_{s,b}} \text{s}^{\beta_{s,b}-1}$ );



$\beta_{s,b}$  – expoente de erosão (depende essencialmente da dimensão do material de fundo) (-);

$U_B$  – velocidade média de escoamento na brecha ( $\text{ms}^{-1}$ ).

No RoDaB o cálculo da evolução do fundo da brecha é baseado nas equações (3.1) em (3.2), usando a próxima expressão para a determinação do expoente de erosão do fundo da brecha vem:

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -C_{s,b} \frac{Q_B(t)^{\beta_{s,b}}}{A_B(t)^{\beta_{s,b}}} \quad (3.8)$$

em que:

$A_B$  - área de vazão da brecha ( $\text{m}^2$ );

$C_{s,b}$  - coeficiente de erosão do fundo da brecha ( $\text{m}^{1-\beta_{s,b}} \text{s}^{-1+\beta_{s,b}}$ ).

O coeficiente de erosão de fundo da brecha é calculado a partir das constantes  $\alpha_{s,b}$  e de  $I/(1-\rho)$  ( $\text{m}^{1-\beta} \text{m}^{\beta-1}$ ). A secção da brecha é calculada multiplicando a largura média pela carga hidráulica sobre a soleira da brecha. A partir das experiências em laboratório e de dados empíricos chegou-se à conclusão que a razão entre a erosão lateral média e a do fundo da brecha é de 80% da erosão média.

De acordo com resultados experimentais para barragens de enrocamento, o modelo RoDaB pode assumir, no início do cálculo, uma largura final da brecha igual a 1,7 vezes a altura da barragem. A configuração final da brecha obtida também através de resultados experimentais para barragens de enrocamento de Franca e Almeida (2002) pode ser usada como limite final da sua evolução. Estas condições impostas reflectem as características específicas da brecha de uma barragem de enrocamento, de acordo com resultados experimentais.

### 3.3.2 Modelo Empírico de Evolução da Brecha

Esta abordagem, como já mencionado, implica o conhecimento *à priori* dos parâmetros da brecha (geometria final da brecha, tempo de formação da brecha e expoente de erosão da brecha). Existem diversas formulações empíricas para a estimativa dos parâmetros da brecha em barragens de aterro, geometria e tempo de formação (Wahl, 2001). Um exemplo, muito utilizado, de formulação matemática para estimar a configuração geométrica final da brecha é a metodologia apresentada por Froehlich (1987).

A evolução da brecha tem como base a formulação matemática apresentada por Fread (1984):

$$N_B = N_C - \left(\frac{t}{t_B}\right)^{\rho_N} h_B \quad (3.9)$$

$$W_B(t) = W_B^{ini} + \left(\frac{t}{t_B}\right)^{\rho_W} (W_B^{fin} - W_B^{ini}) \quad (3.10)$$

em que:

$N_C$  - cota do coroamento da barragem; (m)

$W_B$  - largura da brecha; (m)

$\rho_N$  - expoente de evolução do fundo da brecha (normalmente tomado igual a 1, evolução linear); (-)

$t_B$  - tempo de formação da brecha; (s)

$h_B$  - profundidade final da brecha; (m)

$\rho_W$  - expoente de evolução da largura da brecha (normalmente tomado igual a 1, evolução linear); (-)

### 3.3.3 Modelo Semi-empírico de Evolução da Brecha

Nesta formulação a configuração final da brecha é também necessária como condição final da simulação da evolução da brecha, sendo definida por uma largura e altura final que limitam o processo de evolução da brecha. Contudo o cálculo da evolução da brecha é feito de acordo com o capítulo 3.3.1, sendo as equações de erosão para o desenvolvimento da cota do fundo e da largura da brecha as seguintes:

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -C_{s,b} \frac{Q_B(t)^{\beta_{s,b}}}{A_B(t)^{\beta_{s,b}}} \quad (3.11)$$

$$\frac{dW_B(t)}{dt} = -C_{s,m} \frac{Q_B(t)^{\beta_{s,m}}}{A_B(t)^{\beta_{s,m}}} \quad (3.12)$$

em que:

$C_{s,b}$  - coeficiente de erosão do fundo da brecha; ( $m^{1-\beta_{s,b}} s^{-1+\beta_{s,b}}$ )

$\beta_{s,b}$  - expoente de erosão do fundo da brecha; (-)

$A_B(t)$  - área da brecha; ( $m^2$ )

$C_{s,m}$  - coeficiente de erosão das margens da brecha; (-)

$\beta_{s,m}$  - expoente de erosão das margens da brecha; (-)

Franca e Almeida (2004) referem que os coeficientes e expoentes de erosão apresentados são função da erodibilidade do material da barragem, podendo eventualmente ser estimados a partir da curva granulométrica dos agregados que constituem a mesma.

### 3.3.4 Modelo Racional de Evolução da Brecha

Neste modelo, o cálculo da evolução da geometria da brecha é feito da mesma forma do que no modelo semi-empírico, estando a evolução da brecha apenas limitada pela configuração do vale. Toda a simulação é baseada nas características de erodibilidade do material da barragem, no entanto não há limitação da configuração inicial ou final da brecha. A evolução da geometria da brecha está apenas limitada fisicamente pela largura do vale e pela cota do fundo do mesmo. A brecha desenvolve-se enquanto a capacidade erosiva do escoamento o permitir.

A grande vantagem desta formulação é ser apenas dependente das características geométricas da barragem, do material que a constitui (parâmetros  $C$  e  $\beta$ ) e do coeficiente de resposta dinâmica da barragem ( $\lambda_R$ ), não dependendo de parâmetros empíricos determinados com recurso a regressões a partir de casos observados.

### 3.4 Entrada e Saída de Dados

O utilizador definirá à partida a metodologia a utilizar na simulação de desenvolvimento da brecha (racional, empírica ou semi-empírica atrás descritas), tendo para tal que fornecer os respectivos parâmetros, além de todos os dados relativos às características da barragem e da albufeira. O RoDaB permite a análise de resultados de duas formas distintas: o utilizador pode utilizar um pós-processador incorporado no modelo para análise gráfica; ou então poderá exportar os dados para um ficheiro em formato do tipo *xls* que poderá ser editado numa folha de cálculo de utilização comum. O modelo RoDaB fornece séries temporais de dados respeitantes às seguintes variáveis:

- caudal afluente;
- nível de água na albufeira;
- volume de água na albufeira;
- caudal efluente sobre o coroamento;
- caudal efluente pela brecha;
- caudal efluente total;
- nível da brecha;
- largura da brecha.

Apresenta-se de seguida uma imagem da janela principal do modelo RoDaB (Fig. 3.1), bem como um exemplo de apresentação de resultados gráficos (Fig. 3.2).

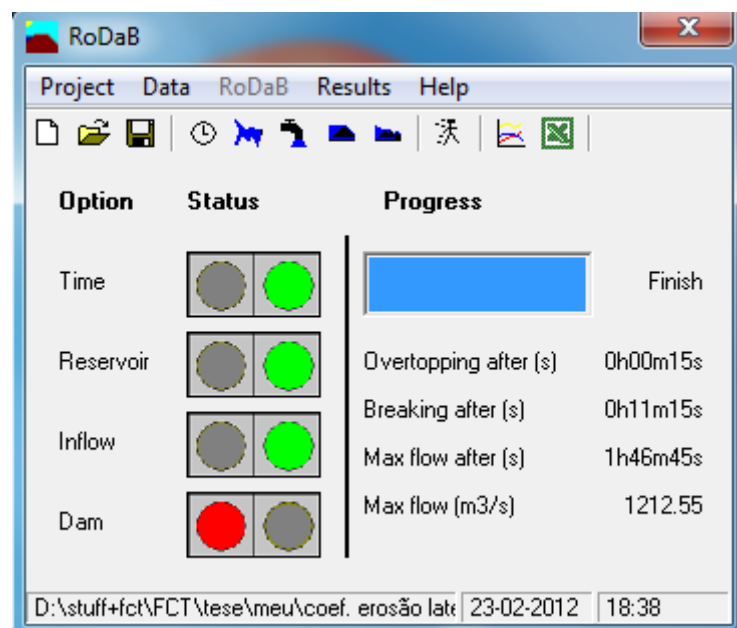


Figura 3.1 – Imagem da janela principal do programa RoDaB

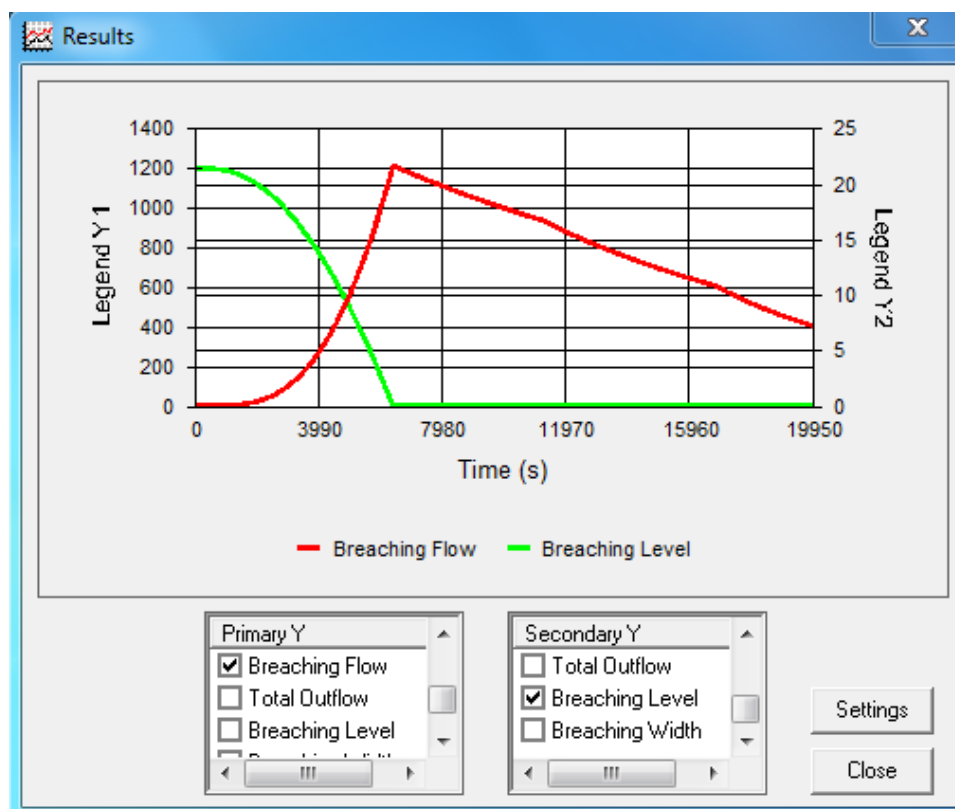


Figura 3.2 – Imagem da apresentação de resultados do RoDaB (análise gráfica)

## 4 Classificação de Albufeiras e Estimação de Caudal Máximo Efluente

### 4.1 Considerações Gerais

No presente capítulo é feita uma abordagem à classificação de albufeiras de acordo com a sugestão de Walder e O'Connor (1997) (grande albufeira/erosão rápida e pequena albufeira/erosão lenta), tendo em conta a sensibilidade do caudal máximo efluente pela brecha às taxas de erosão do fundo desta e da descida do nível da albufeira. Os referidos autores introduzem um parâmetro, adimensional, para classificação do tipo de situação.

Propõe-se uma análise que conduzirá ao estabelecimento de um parâmetro de classificação de albufeiras que possa ser determinado em função da resposta dinâmica da albufeira e das características de erodibilidade dos materiais, baseado em Franca, (2002).

São também analisadas as condições para as quais ocorre o caudal efluente máximo na brecha com o objectivo da determinação do seu valor e do instante da sua ocorrência tendo em vista a construção de um hidrograma de cheia padrão para a ruptura de barragens de enrocamento. Por fim, apresenta-se uma sugestão para a construção de um hidrograma efluente padrão, adimensional.

O processo de esvaziamento de uma albufeira resultante da ruptura de uma barragem de aterro tem em conta as equações de conservação de massa aplicada à albufeira (expressão (3.1)) e de vazão da brecha que se propõe seja estimada com base na equação de um descarregador (expressão (4.1)):

$$(Q_i - Q_B - Q_C) = \frac{dV_R}{dt} \quad (3.1)$$

$$Q_B(t) = C(t) \cdot W_B(t) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (N_R(t) - N_B(t))^{1,5} \quad (4.1)$$

É referida a influência da taxa de erosão da brecha e da taxa de esvaziamento da albufeira no caudal de ponta do hidrograma e são apresentados alguns casos particulares onde é possível obter soluções analíticas. É feita uma abordagem à classificação de albufeiras de acordo com a sugestão de Walder e O'Connor (1997) e Franca (2002) (“grande” albufeira/erosão rápida e “pequena” albufeira/erosão lenta) apresentando-se um parâmetro de classificação.

O conceito de “grande” albufeira/erosão rápida e “pequena” albufeira/erosão lenta descrito em Walder e O'Connor (1997) e Wahl (2001) tem em conta a sensibilidade do caudal máximo efluente pela brecha às taxas de erosão do fundo desta e da descida do nível da albufeira. Os referidos autores introduzem um parâmetro adimensional para classificação do tipo de situação.

No primeiro caso, “grande” albufeira/erosão rápida, o caudal máximo efluente ocorre quando a brecha atinge a sua cota de soleira mínima, antes que se dê um esvaziamento significativo da albufeira. Neste caso, o valor de caudal de ponta efluente não é influenciado pela taxa de abaixamento da brecha, nem indirectamente pelo valor do volume da albufeira, mas apenas pela altura total da brecha (carga máxima sobre a brecha) e pela configuração final da brecha (Franca, et al., 2004).

No segundo caso, “pequena” albufeira/erosão lenta, o pico do hidrograma efluente ocorre antes da brecha atingir a cota mínima. Nestes casos o caudal de ponta efluente depende fortemente da razão entre as taxas de erosão da brecha e de esvaziamento da albufeira, e pode ser substancialmente menor do que no primeiro caso (Franca, et al., 2004).

Por sua vez, Singh (1996) apresenta soluções analíticas para o cálculo do esvaziamento da albufeira e da evolução da brecha para casos particulares: brechas rectangulares, triangulares e trapezoidais.

## 4.2 Relação entre a Evolução do Nível na Albufeira e o Caudal Efluente

Pretende-se obter uma solução analítica para a determinação do caudal máximo na brecha resultante da ruptura de uma barragem de aterro e o instante em que este ocorre, em função das características geométricas da barragem, do material que a constitui e da albufeira. Para tal consideram-se as seguintes simplificações iniciais, válidas durante o desenvolvimento da brecha:

- caudal afluente à albufeira nulo;
- caudal efluente sobre o coroamento nulo;
- coeficiente de vazão da brecha constante no tempo.

O modelo de brecha considerado no desenvolvimento das equações é ilustrado pela Figura 4.1.

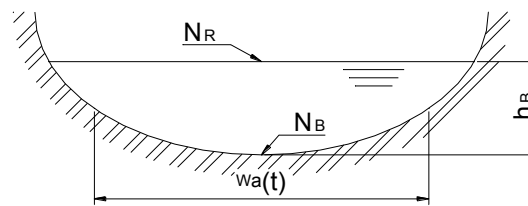


Figura 4.1 – Modelo geométrico da brecha

Com as hipóteses consideradas e juntando o coeficiente de vazão (constante) com as restantes constantes da expressão (4.1), as expressões (3.1) e (4.1) passam a apresentar a seguinte forma:

$$-Q_B = \frac{dV_R}{dt} \quad (4.2)$$

$$Q_B(t) = C_v \cdot W_B(t) \cdot (N_R(t) - N_B(t))^{1,5} \quad (4.3)$$

A consideração somente do caudal pela brecha na expressão (4.2) é também utilizada por Singh (1996) e justifica-se pela grande amplitude da variação de nível provocada por este face ao caudal afluente e ao caudal sobre o coroamento.

À semelhança do que foi mencionado anteriormente para o caudal efluente total, da expressão (4.2) obtém-se que o caudal efluente pela brecha corresponde à derivada do volume na albufeira em ordem ao tempo, ocorrendo o caudal máximo quando a variação do volume em valor absoluto é máxima ou seja quando a segunda derivada do volume é nula o que corresponde ao ponto de inflexão no qual a concavidade da curva de esvaziamento muda de negativa para positiva (Figura 4.2).

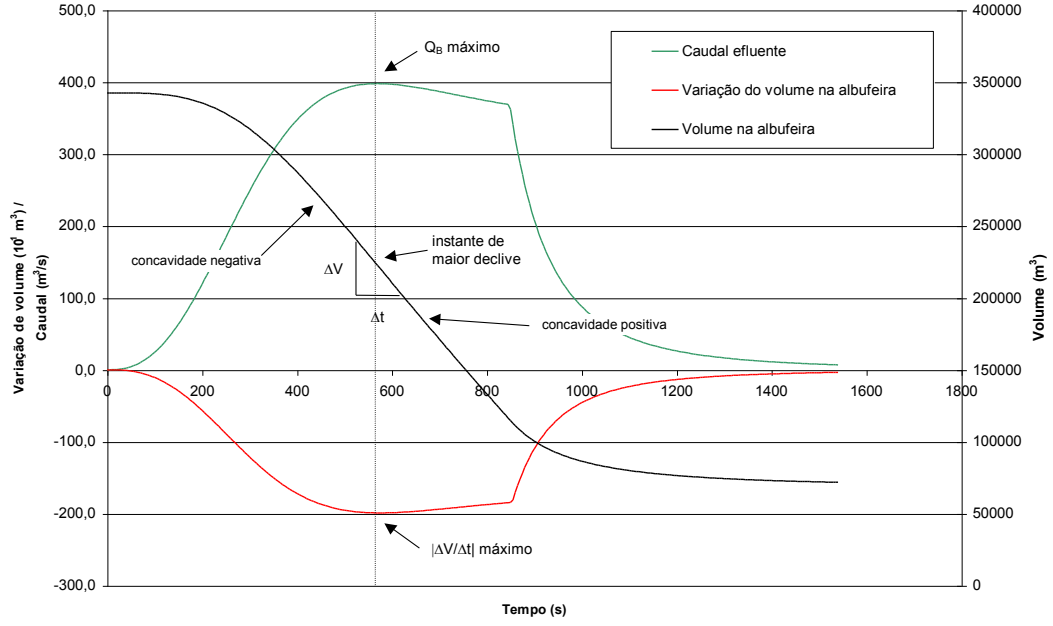


Figura 4.2 – Exemplo de variação do caudal na brecha, do volume da albufeira e da derivada ( $dV/dt$ ). (in Franca, 2002)

Para a obtenção analítica do caudal máximo é necessário verificarem-se as duas seguintes condições:

$$\frac{dQ_B}{dt} = 0 \quad (4.4)$$

e

$$\frac{d^2Q_B}{dt^2} < 0 \quad (4.5)$$

Aplicando a expressão (4.4) à expressão de vazão (4.3) obtém-se a seguinte igualdade:

$$\frac{dW_B(t)}{dt} \cdot (N_R(t) - N_B(t)) + 1,5 \cdot W_B(t) \cdot \frac{d(N_R(t) - N_B(t))}{dt} = 0 \quad (4.6)$$

Esta expressão pode ser alterada de modo a evidenciar as derivadas relativas de cada uma das funções respeitantes à evolução da secção do escoamento da brecha, largura e altura.

$$\frac{dW_B(t)}{dt} \cdot \frac{1}{W_B(t)} = -1,5 \cdot \frac{d(N_R(t) - N_B(t))}{dt} \cdot \frac{1}{(N_R(t) - N_B(t))} \quad (4.7)$$

A expressão (4.7) define as condições em que ocorre o caudal máximo efluente pela brecha. Para que se dê a máxima vazão na brecha é necessário que a taxa relativa de erosão lateral seja igual a uma vez e meio o simétrico da taxa relativa de evolução da altura do escoamento sobre a soleira da brecha.

A variação do nível da albufeira relaciona-se com a variação de volume armazenado através da curva de volumes da albufeira e, usualmente, esta relação é expressa em termos de uma constante denominada coeficiente dinâmico ou coeficiente de resposta dinâmica da albufeira  $\lambda_R$ .

$$\Delta N_R = \lambda_R \cdot \Delta V_R \quad (4.8)$$

$\lambda_R$  é definido por:

$$\lambda_R = \frac{1}{A_R} \quad (4.9)$$

Este coeficiente dinâmico quantifica a rapidez de resposta da albufeira, no que respeita ao nível de água, a variações de volume impostas nas fronteiras da albufeira. Da expressão (4.2) e tendo em conta a relação representada por (4.8) obtém-se então:

$$\frac{dN_R(t)}{dt} = -\lambda_R \cdot Q_B \quad (4.10)$$

Esta definição é válida quando a variação de nível  $\Delta N_R$  for pequena (numa simulação, com intervalos de tempo de cálculo pequenos, esta hipótese verifica-se entre cada dois instantes de cálculo). A barragens de aterro correspondem, geralmente, vales largos o que reforça a validade da hipótese deste coeficiente ser considerado constante no âmbito de uma análise aproximada.

### 4.3 Modelo Simplificado da Brecha

Analizada a relação entre a evolução do nível da albufeira e o caudal na brecha impõe-se determinar a relação entre a erosão na brecha e o valor do caudal na brecha por forma a se obterem expressões que representem as restantes variáveis intervenientes na expressão (4.7) ( $W(t)$  e  $N_B(t)$ ) em função do caudal.

Propõe-se a aplicação da equação de Exner (1925) para a determinação da variação da cota de soleira de um canal de fundo móvel, ao longo da direcção do escoamento na brecha para a definição da taxa de evolução da cota de soleira:

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -a_E \cdot \frac{dU_B}{dx} \quad (4.11)$$

onde:

$a_E$  – coeficiente de erosão do material do fundo [m];

$U_B$  – velocidade média do escoamento na brecha [ $\text{ms}^{-1}$ ];

Para o presente estudo tem apenas interesse a análise da secção de controlo do escoamento da brecha, pelo que se considera uma análise pontual onde  $\Delta x$  é tão pequeno quanto seja desejado. A Figura 4.3 representa um perfil, na direcção do escoamento, do modelo de brecha considerado na análise apresentada:



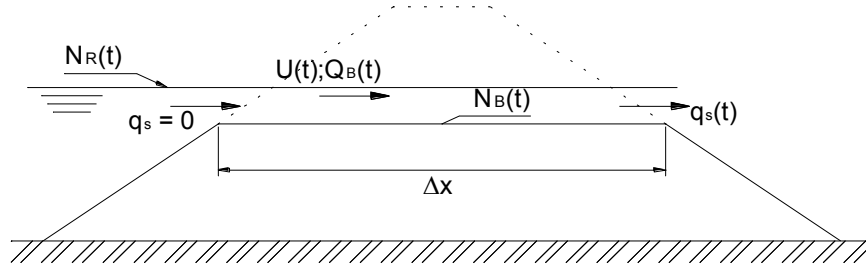


Figura 4.3 - Modelo considerado no cálculo da variação do fundo da brecha.

Esta expressão pode ser reescrita na forma de uma equação de continuidade da fase sólida (Graf, 1998):

$$\frac{dN_B(t)}{dt} + \frac{1}{1-\rho} \cdot \frac{dq_{s,b}}{dx} = 0 \quad (4.12)$$

onde:

$\rho$  – porosidade dos sedimentos do fundo [-];

$q_{s,b}$  – caudal sólido específico de material do fundo [ $m^2s^{-1}$ ] (o índice  $b$  designa fundo).

Para a presente análise apenas interessa o transporte sólido por arrastamento uma vez que é o que provoca o abaixamento da brecha pelo que, no âmbito deste trabalho, caudal sólido significa caudal sólido por arrastamento.

Simplificando a expressão (4.12):

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -C \cdot \frac{dq_{s,b}}{dx} \quad (4.13)$$

Uma vez que o presente cálculo está a ser feito numa secção apenas e, admitindo que na fronteira de montante (albufeira) não existe transporte sólido ( $q_{smontante} = 0$ ), a variação do caudal sólido com a distância é igual ao caudal sólido na fronteira de jusante. Considerando uma distância unitária, ( $\Delta x = 1m$ ) a expressão anterior transforma-se em:

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -C \cdot q_{s,b} \quad (4.14)$$

A avaliação do caudal sólido, de acordo com as formulações comuns, pode ser expressa em função da velocidade média na brecha da seguinte forma (Graf, 1998):

$$q_{s,b} = \alpha_{s,b} \cdot U_B^{\beta_{s,b}} \quad (4.15)$$

onde:

$\alpha_{s,b}$  e  $\beta_{s,b}$  – coeficientes de erosão que dependem essencialmente da granulometria do material do fundo [ $m^{3-\beta_{s,b}}s^{-1+\beta_{s,b}}$ , -].

Uma vez que a velocidade depende do caudal na brecha e da respectiva área, a relação anterior pode ser expressa do seguinte modo:

$$q_{s,b} = \alpha_{s,b} \cdot \frac{Q_B^{\beta_{s,b}}}{A_B^{\beta_{s,b}}} \quad (4.16)$$

Onde:

$A_B$  – área da brecha [m<sup>2</sup>].

Aplicando esta relação na expressão (4.14) tem-se:

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -C \cdot \alpha_{s,b} \cdot \frac{Q_B^{\beta_{s,b}}}{A_B^{\beta_{s,b}}} \quad (4.17)$$

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -C_{s,b} \cdot \frac{Q_B^{\beta_{s,b}}}{A_B^{\beta_{s,b}}} \quad (4.17a)$$

onde:

$C_{s,b}$  – coeficiente de erosão do fundo da brecha [m<sup>1-β<sub>s,b</sub></sup> s<sup>-1+β<sub>s,b</sub></sup>].

De acordo com a expressão (4.16) é possível fazer-se uma análise comparativa entre a evolução da brecha em vários tipos de barragens de aterro, tendo em consideração os parâmetros de erosão do material da barragem  $C_{s,b}$  (ou  $\alpha_{s,b}$ ) e  $\beta_{s,b}$ .

A expressão (4.6) é a condição geral necessária para a determinação do caudal máximo numa brecha tendo em conta a evolução desta e o esvaziamento da albufeira, podendo ser aplicada a qualquer tipo de barragem. De facto, as características da barragem determinam a lei de evolução da geometria da brecha (largura e profundidade) e a relação entre o volume da albufeira e o nível de água nesta impõem a respectiva lei de esvaziamento.

A complexidade da expressão (4.6) não permite a obtenção de uma solução analítica geral para a determinação do caudal máximo na brecha. Todavia, se forem admitidas determinadas hipóteses simplificativas, é possível encontrar soluções particulares para esta equação.

Na presente análise admite-se como hipótese válida que a taxa de erosão no fundo da brecha é de uma ordem de grandeza superior à taxa de erosão verificada nas paredes da brecha. Assim, na expressão (4.7) admite-se que o primeiro termo é negligenciável face ao segundo termo, donde:

$$0 = 1,5 \frac{d(N_R(t) - N_B(t))}{dt} \cdot \frac{1}{(N_R(t) - N_B(t))} \quad (4.18)$$

Esta simplificação introduzida implica a consideração de uma brecha rectangular (figura 4.4). Para que a expressão anterior seja verdadeira, a taxa de erosão do fundo e a derivada da curva de esvaziamento deverão ser idênticas:

$$\frac{d(N_R(t) - N_B(t))}{dt} = 0 \quad (4.19)$$

$$\frac{dN_R(t)}{dt} = \frac{dN_B(t)}{dt} \quad (4.20)$$

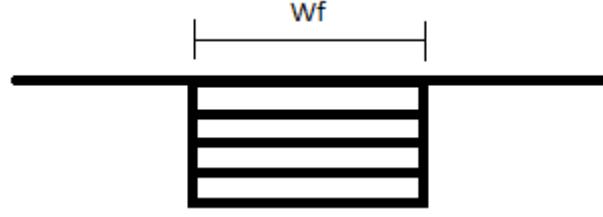


Figura 4.4 – Exemplo ilustrativo da evolução da brecha rectangular com largura constante

Aplicando à expressão (4.20) as relações determinadas para a variação do nível na albufeira (expressão (4.10)) e para a taxa de erosão na soleira (expressão 4.17a) em função do caudal na brecha tem-se:

$$-\lambda_R \cdot Q_B = -C_{s,b} \cdot \frac{Q_B^{\beta_{s,b}}}{A_B^{\beta_{s,b}}} \quad (4.21)$$

donde,

$$Q_B = \left( \frac{A_B^{\beta_{s,b}} \lambda_R}{C_{s,b}} \right)^{\frac{1}{\beta_{s,b}-1}} = \left( \frac{A_B^{\beta_{s,b}}}{A_R} \cdot \frac{1}{C_{s,b}} \right)^{\frac{1}{\beta_{s,b}-1}} \quad (4.22)$$

Esta expressão constitui a solução analítica geral do valor do caudal máximo efluente pela brecha em função da geometria da albufeira (coeficiente de resposta dinâmica -  $\lambda_R$ ) das características do material constituinte da albufeira (coeficientes de erosão -  $C_{s,b}$  e  $\beta_{s,b}$ ) e da geometria da brecha ( $A_B$ ), para o modelo de brecha simplificado.

A variável área da brecha implica uma estimativa, à partida, baseada em dados de casos reais ou em resultados de experimentação física. Uma simplificação pode ser considerada com base nas expressões deduzidas por Singh (1996), para a evolução de brechas rectangulares com taxas de erosão linear e não-linear, respectivamente:

$$\frac{dN_R(t)}{dN_B(t)} = \frac{W(t)}{\alpha_2 A_R} (N_R(t) - N_B(t)) = \frac{A_B(t)}{\alpha_2 \cdot A_R(t)} \quad (4.23)$$

$$\frac{dN_R(t)}{dN_B(t)} = \frac{W(t)}{\alpha_2 A_R} \alpha_1^{1-\beta_1} (N_R(t) - N_B(t))^{0,5(3-\beta_1)} \quad (4.24)$$

onde:

$\alpha_2$  – coeficiente de erosão (introduzido por Singh, 1996);

$\alpha_1, \beta_1$  – coeficientes relacionados com a vazão da brecha (introduzidos por Singh, 1996).

Da relação (4.20) conclui-se que, quando ocorre o caudal máximo, o termo da esquerda das expressões (4.23) e (4.24) é igual à unidade de onde, em função dos parâmetros relativos à erosão (dependentes das características do material da barragem) e à vazão da brecha ( $\alpha_1, \beta_1$ ), é possível determinar a área líquida máxima nesse instante, em função da área superficial da albufeira.

Uma vez que se considera uma brecha rectangular de largura constante ( $W_f$  é constante, ou seja, o coeficiente de erosão lateral é nulo), o instante de área líquida máxima da brecha corresponde ao instante de carga máxima, calculada de acordo com as duas expressões seguintes, para taxas de erosão linear e não-linear, respectivamente.

$$[(N_R(t) - N_B(t))]_{m\acute{a}xima} = \frac{\alpha_2 A_R}{W} \quad (4.25)$$

$$[(N_R(t) - N_B(t))]_{m\acute{a}xima} = \left( \frac{\alpha_2 A_R}{W \cdot \alpha_1^{1-\beta_1}} \right)^{\frac{1}{0,5(3-\beta_1)}} \quad (4.26)$$

Com estas expressões anteriores, o cálculo da área líquida do escoamento (produto da carga máxima pela largura constante da brecha) na brecha necessário ao cálculo do caudal máximo pela expressão (4.22), faz-se recorrendo apenas a uma variável estimada empiricamente: a largura da brecha.

A título de exemplo, para uma variação quadrática da taxa de erosão do fundo do canal ( $\beta_{s,b} = 2$ ) com o caudal vem da expressão (4.22) que a seguinte relação teria de ser satisfeita:

$$Q_B = \frac{1}{C_{s,b}} \cdot \frac{A_B^2}{A_R} \quad (4.27)$$

## 4.4 Análise Dimensional

### 4.4.1 Parâmetro de Classificação de Albufeira

O conceito de “grande” albufeira e “pequena” albufeira aplica-se a barragens de aterro e permite caracterizar o hidrograma efluente em caso de ruptura de uma barragem de aterro. A designação de “grande” ou “pequena” albufeira não se relaciona com o volume absoluto desta mas com a relação entre a respectiva resposta dinâmica e a taxa de erosão na brecha.

Esta divisão poderá ser válida para, de um modo expedito, avaliar o tipo de hidrograma efluente e a perigosidade induzida por uma determinada barragem no vale através da cheia induzida pelo referido hidrograma. Apresenta-se neste sub-capítulo uma proposta de parametrização das albufeiras com vista à sua classificação.

Walder e O'Connor (1997) estabelecem a seguinte parâmetro adimensional  $\eta$  para ser utilizado na classificação das albufeiras e que orienta a caracterização do tipo de hidrograma efluente pela brecha:

$$\eta = \frac{k \cdot V_w}{\sqrt{g} \cdot \Delta N_R^{7/2}} \quad (4.28)$$

onde:

$k$  – taxa média de erosão da brecha [ $\text{ms}^{-1}$ ];

$\Delta N_R$  – descida total do nível da albufeira [m]

Se  $\eta$  for superior a 1,0 a albufeira é considerada uma “grande” albufeira (hidrograma efluente do tipo da Figura 2.3); se  $\eta$  for inferior a 1,0 a albufeira é considerada uma “pequena” albufeira (hidrograma efluente do tipo da Figura 2.4).

O parâmetro proposto caracteriza a relação entre a taxa de erosão da brecha e a taxa de esvaziamento da albufeira, sendo a taxa de erosão definida pela razão entre a profundidade máxima da brecha e o respectivo tempo de formação. O cálculo de  $\eta$  implica, portanto, o conhecimento à partida de ambas as variáveis.

Propõe-se uma análise que conduzirá ao estabelecimento de um parâmetro de classificação de albufeiras que possa ser determinado em função da resposta dinâmica da albufeira e das características de erodibilidade dos materiais.

A análise de casos particulares permite estabelecer as duas seguintes situações extremas:

Albufeira “grande”:  $\lambda_R \rightarrow 0$

e

Albufeira “pequena”:  $C_{s,b} \rightarrow \infty$

Considere-se a expressão (4.22) escrita da seguinte forma:

$$1 = C_{s,b} \cdot Q_B^{\beta_{s,b}-1} \cdot \frac{A_R}{A_B^{\beta_{s,b}}} \quad (4.22a)$$

Atendendo a que esta expressão adimensional representa precisamente a relação entre a taxa de erosão da soleira da brecha e a taxa de esvaziamento da albufeira, propõe-se a adopção de um parâmetro classificador das albufeiras ( $\mu$ ) com base em (4.22a) utilizando valores de referência para o caudal e para a área da brecha ( $Q'_B$  e  $A'_B$ ), baseados em características conhecidas *a priori*:

$$\mu = C_{s,b} \cdot Q'_B{}^{\beta_{s,b}-1} \cdot \frac{A_R}{A'_B{}^{\beta_{s,b}}} \quad (4.29)$$

Introduz-se um caudal de referência calculado utilizando a seguinte equação baseada na fórmula de vazão em soleira livre na brecha, considerando a altura da barragem como a carga máxima sobre a soleira:

$$Q'_B = \sqrt{g \cdot h_D} \cdot h_D \cdot W_f \quad (4.30)$$

De acordo com Singh (1996), o caudal que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao caudal que passa por um descarregador rectangular de soleira espessa, introduzindo assim um coeficiente de vazão na brecha:

$$Q'_B = C_V \cdot W_f \cdot h_D^{1.5} \quad (4.31)$$

O valor da área da brecha de referência determina-se pelo produto de  $W_f$  pela altura da barragem:

$$A'_B = h_D \cdot W_f \quad (4.32)$$

O valor da área da albufeira determina-se dividindo o seu volume pela altura da barragem:

$$A_R = \frac{V}{h_D} \quad (4.33)$$

A altura da barragem nas expressões (4.31) e (4.32) poderia ser substituída pelo valor da profundidade da brecha determinada empiricamente. Optou-se por manter a altura da barragem o que fornece uma formulação mais geral.

Fazendo uma análise sistemática da expressão (4.29), recorrendo à simulação numérica, com variação das variáveis correspondentes às características do material da barragem, da albufeira e da largura da brecha, devidamente adimensionalizadas, é possível determinar-se valores limite do parâmetro  $\mu$  para o qual se dá a transição entre albufeira grandes e pequenas.

Se o volume da albufeira for expresso em função da altura da barragem através de um parâmetro adimensional  $n$  (expressão (4.34)), o desenvolvimento da expressão (4.29), com a aplicação de (4.31), (4.32) e (4.33), permite obter uma relação linear do parâmetro  $\mu$  com o parâmetro adimensional  $n$  (expressão (4.35)):

$$V = n \cdot h_D^3 \quad (4.34)$$

$$\mu = \frac{C_{s,b} \cdot C_V^{(\beta_{s,b}-1)} \cdot h_D^{0,5(\beta_{s,b}+1)}}{\underbrace{W_f}_{\alpha}} \cdot n = \alpha \cdot n \quad (4.35)$$

onde:

$\alpha$  - constante de proporcionalidade [-]

$n$  – representa a relação entre o volume da albufeira e a altura da barragem que o suporta, e representa a resposta dinâmica da albufeira.

Através destes parâmetros vai-se propor uma solução geral para avaliação de qualquer albufeira, com base em várias simulações de ruptura obtidas no modelo RoDaB.

Um estudo sistemático para vários pares de valores de  $C_{s,b}$  e  $\beta_{s,b}$  recorrendo a simulações numéricas onde as taxas de evolução da brecha e do nível na albufeira são definidas por (4.17) e (4.10) respectivamente, permitirá criar ábacos em que facilmente se consiga, em função da área superficial da albufeira, estimar o tipo de albufeira e de hidrograma efluente.

Este estudo incidirá sobre a determinação dos valores limite de  $\alpha$  e  $n$ , demonstrados por  $\alpha^*$  e  $n^*$  daqui adiante.

#### 4.4.2 Caudal Máximo Efluente

A análise sistemática anteriormente referida conduzirá a um procedimento semelhante para a determinação de hidrogramas efluentes pela brecha em função dos mesmos parâmetros.

De facto, como foi mostrado, a evolução de uma brecha numa barragem de aterro pode ser determinada analiticamente em função do volume da albufeira (ou do coeficiente dinâmico da albufeira representado pelo parâmetro adimensional  $n$ ) e das características de erodibilidade do material que constitui o corpo da barragem.

Assim, com o recurso à utilização de parâmetros adimensionais e recorrendo uma vez mais a simulações numéricas, é possível a construção de hidrogramas adimensionais, parametrizados pelas variáveis  $h_D$  e  $g$ , para várias combinações de valores  $n$ ,  $\beta_{s,b}$  e  $C_{s,b}$ , obtendo-se assim o parâmetro adimensional do caudal efluente máximo ( $Q^*$ ):

$$Q^* = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{h_D^{5/2} \cdot g^{1/2}} \quad (4.36)$$

## 4.5 Dados de Base

### 4.5.1 Validação e Calibração dos Parâmetros de Erosão da Brecha

A presente dissertação foi realizada com base em dados apresentados no trabalho de Garcia (2011), cujo objectivo foi, através de dados reais estimados de quatro casos de estudo de rupturas documentadas (três barragens de aterro e uma de enrocamento), validar e calibrar o modelo computacional RoDaB.

Para tal é essencial compreender o modelo computacional e a respectiva entrada e saída de dados, com vista à realização de diversas simulações para calibração dos parâmetros de erosão da brecha e validação do modelo. Como resultado das simulações foi apresentada uma compilação de parâmetros do RoDaB com base em características gerais da barragem (Garcia, 2011).

### 4.5.2 Resultados das Simulações do Modelo RoDaB

Garcia (2011) fez a calibração dos parâmetros de erosão da brecha e respectiva validação no modelo RoDaB para a ruptura das barragens de Goose Creek, South Fork, Oros e Castlewood, utilizando tanto os modelos de evolução da brecha racional como semi-empírico.

Das diferentes abordagens de evolução da brecha apresentadas por Garcia (2011), apenas foram considerados os dados referentes às simulações de ruptura feitas através do modelo racional de evolução da brecha, e entre estes apenas os que mais se aproximavam dos resultados de caudal máximo documentados. No quadro seguinte é apresentado o resumo dos resultados obtidos por Garcia (2011) que foram utilizados na realização deste trabalho.

Quadro 4.1 – Resumo dos resultados dos parâmetros da brecha obtidos por Garcia (2011)

Barragem	$\beta_{s,b}$	$C_{s,b}$	$C_{s,m}$	$C_v$	$Q_{B,sim}$	$Q_B$	$h_B$		$W_B$		t (h)
							sim	real	sim	real	
Goose Creek	1	0,0010	0,0063	2,21	2716	565	4	4,1	26,3	26,4	0,5
	2	0,0008	0,0050	2,21	5406	565	3,9	4,1	27,2	26,4	0,5
South Fork	1	0,0035	0,0130	1	15408	8500	24,4	24,4	92,5	94,5	0,8
	2	0,0024	0,0080	1	29415	8500	24,6	24,4	87,7	94,5	0,75
Oros	1	0,00128	0,00595	0,3	16254	9630	35,4	35,4	164,9	165	8,5
	2	0,0029	0,01350	0,3	30673	9630	35,4	35,4	166	165	8,5
Castlewood	1	0,0053	0,0110	1	4004	3570	21,3	21,3	45,9	44,2	0,5
	2	0,0043	0,0075	1	6294	3570	21,3	21,3	43	44,2	0,5

Destes parâmetros apenas foram utilizados os expoentes de erosão do fundo da brecha ( $\beta_{s,b}$ ), os coeficientes de erosão do fundo da brecha ( $C_{s,b}$ ) e os coeficientes de vazão da brecha, das diferentes rupturas das barragens. Estando perante o modelo simplificado de brecha rectangular, o coeficiente e expoente de erosão lateral da brecha são considerados nulos no presente trabalho.

#### 4.5.3 Curva de Volumes

Foi utilizada uma equação que representa uma curva de volumes genérica calculada por Garcia (2011) normalizada pela altura da barragem e pelo volume máximo de armazenamento com o objectivo de introduzir no programa RoDaB, para simular a variação do volume de água armazenada na albufeira em função do nível de água da barragem. Este procedimento justifica-se tanto pelo desconhecimento das curvas de volume armazenadas das barragens em estudo, como também para posterior simulação de outras barragens com base nas estudadas por este mesmo autor.

A curva genérica foi criada a partir de uma base de dados de 11 barragens de aterro com diferentes alturas e volume de armazenamento, de forma a que a equação da curva de volumes genérica se adequasse à maior parte das barragens em que possa ser empregue.

A partir da curva de volumes de cada uma das barragens da base de dados, foi realizado um gráfico do volume de água armazenado (expressão (4.37)) em função do nível da albufeira (expressão (4.38)), adimensional, de forma a que de seguida fosse possível estabelecer uma equação geral para a variação do volume de água com a cota na albufeira de todas as barragens.

$$V^* = \frac{V - V_0}{V_C - V_0} \quad (4.37)$$

$$N^* = \frac{N - N_0}{N_C - N_0} \quad (4.38)$$

Onde:

$V^*$  - volume de água da albufeira adimensional; (-)

$V$  - volume de água na albufeira determinada cota; ( $m^3/s$ )

$V_0$  - volume de água na albufeira à cota mínima; ( $m^3/s$ )

$V_C$  - volume de água na albufeira à cota do coroamento da barragem; ( $m^3/s$ )

$N^*$  - cota de água da barragem adimensional; (-)

$N$  - cota de água da barragem; (m)

$N_0$  - cota mínima de água da albufeira; (m)

$N_C$  - cota de água no coroamento da barragem; (m)

Após o cálculo do volume adimensional de água ao longo da altura da barragem das 11 barragens em estudo, foi feita uma regressão não-linear, para estimar a curva de volumes geral que se apresenta na Fig. 4.5.



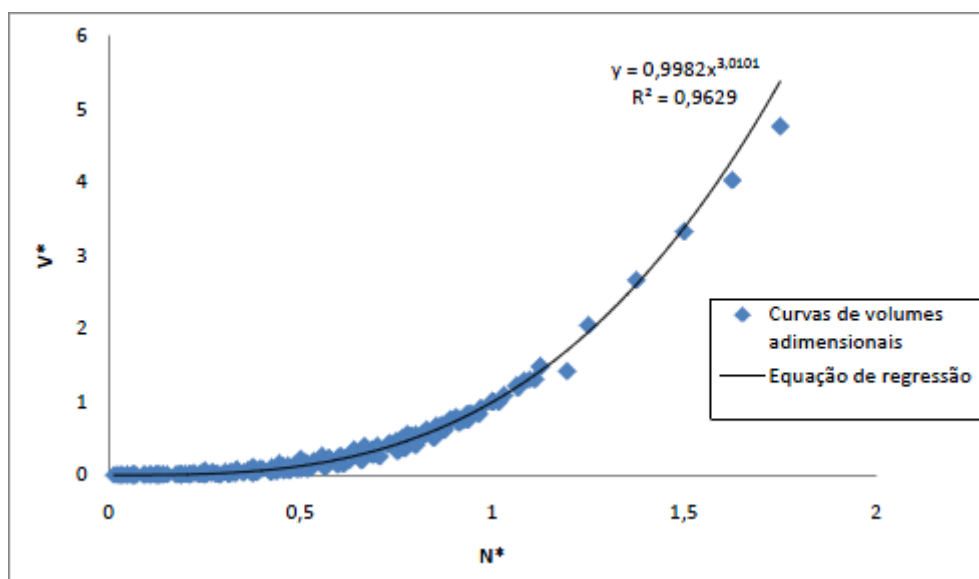


Figura 4.5 – Curva de volumes genérica

Fica-se assim com a seguinte expressão para o cálculo de volumes nas albufeiras:

$$V^* = 0,9982 \cdot N^{*3,0101} \quad (4.39)$$

## 4.6 Classificação de Albufeiras

### 4.6.1 Procedimento de cálculo

Através da variação dos volumes originais das albufeiras conseguem-se simular outros conjuntos barragem/albufeira com as mesmas características físicas de erodibilidade, mas diferentes respostas dinâmicas ao esvaziamento (explicada no subcapítulo 4.5.3), com o objectivo de encontrar o conjunto para o qual se encontra no limite entre uma “grande” e “pequena” albufeira. Tais proporções foram feitas maioritariamente com o aumento ou diminuição, consoante a posição, de 10 em 10% por forma a obter um resultado mais preciso desse mesmo limite. O resultado é obtido através da realização sistemática de simulações, feitas para cada barragem e para cada combinação do quadro 4.2, com o objectivo de encontrar o valor da proporção do volume da albufeira original que se encontra no limite entre grande e pequena albufeira.

Em cada uma das simulações foi obtido o respectivo hidrograma efluente. Na figura seguinte apresenta-se um exemplo do método de aproximação até à chegada do resultado final. Esse limite é atingido quando no pico do caudal efluente, o nível da brecha não se encontra na cota de soleira.

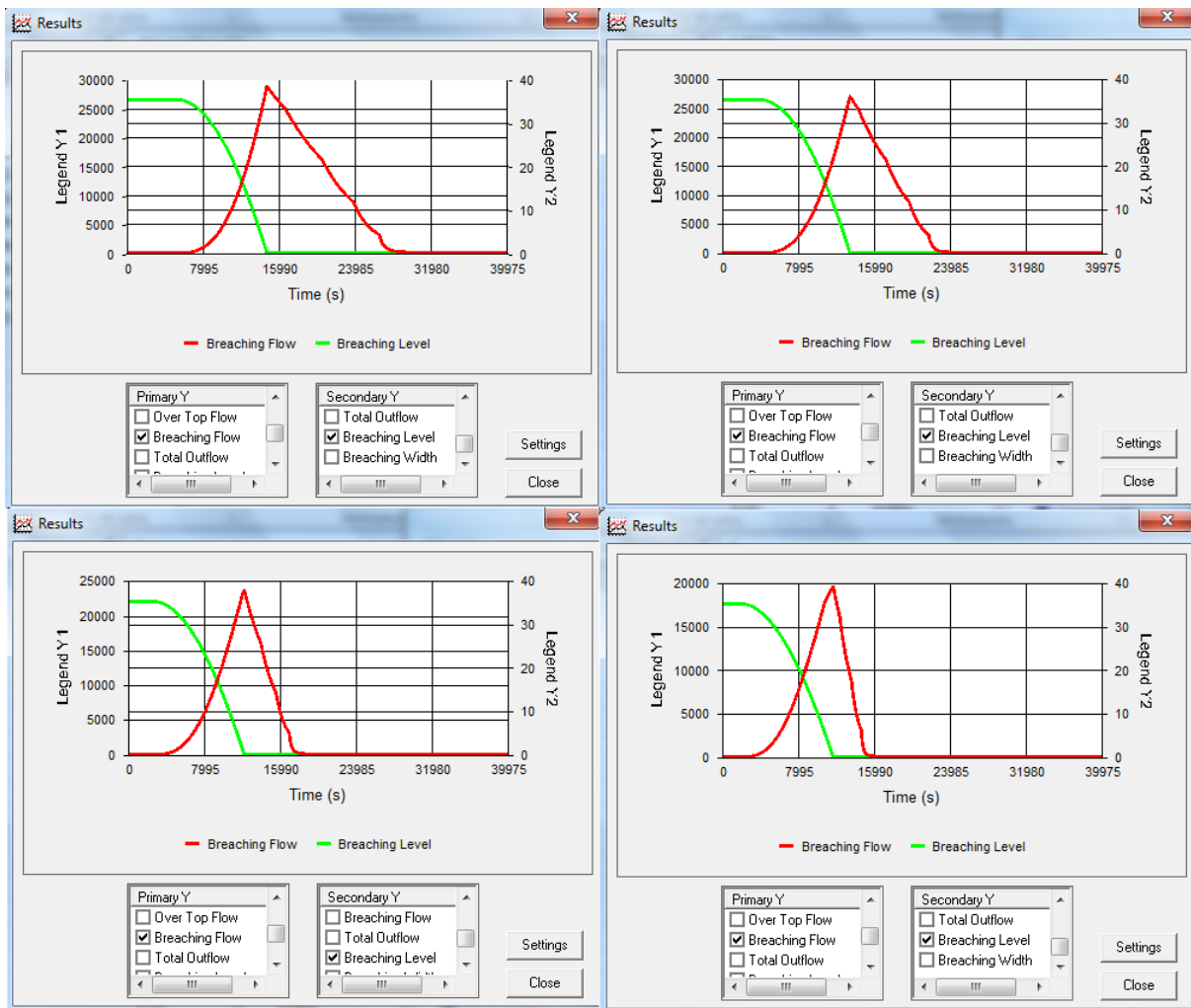


Figura 4.6 – Representação gráfica da determinação do limite entre “grande” e “pequena” albufeira.

Note-se que o caudal máximo efluente vai diminuindo o seu valor e que a inclinação da recta que descreve esse caudal vai aumentando à medida que é diminuído o volume da albufeira. O resultado final é atingido no último quadro quando o valor do caudal máximo é atingido antes de se dar a ruptura total da brecha.

A recolha de dados foi realizada utilizando as quatro barragens, e simulando as combinações de parâmetros de erosão e vazão da brecha sugeridas no quadro 4.3, para cada uma delas. Em cada uma das combinações o objectivo foi o de encontrar o volume de albufeira para o qual estaríamos perante o limite entre “grande” e “pequena”.

Pretende-se assim cobrir uma gama razoável de combinações entre os parâmetros físicos das barragens e a resposta dinâmica da albufeira, partindo de dados devidamente calibrados, logo plausíveis.

#### 4.6.2 Determinação do Limite entre Grande Albufeira e Pequena Albufeira

Foi feita a combinação dos parâmetros da brecha apresentados no quadro 4.1, calibrados por Garcia (2011), com base nas barragens de Goose Creek, South Fork, Oros e Castlewood, em função de  $\beta_{s,b}=1$  e  $\beta_{s,b}=2$ , que originou o quadro 4.2, com vista a introduzir no RoDaB cada uma destas combinações simulando diferentes barragens.

Quadro 4.2 - Combinações dos parâmetros da brecha

$C_v$	$\beta_{s,b}$	$C_{s,b}$
1	1	0,0053
1	1	0,0010
1	1	0,00128
1	1	0,0035
0,3	1	0,0053
0,3	1	0,0010
0,3	1	0,00128
0,3	1	0,0035
2,21	1	0,0053
2,21	1	0,0010
2,21	1	0,00128
2,21	1	0,0035
1	2	0,0043
1	2	0,0008
1	2	0,0029
1	2	0,0024
0,3	2	0,0043
0,3	2	0,0008
0,3	2	0,0029
0,3	2	0,0024
2,21	2	0,0043
2,21	2	0,0008
2,21	2	0,0029
2,21	2	0,0024

Utilizando a curva de volumes genérica, atrás referida (Fig. 4.5), foram calculados os volumes de água em função da cota de água da albufeira para um volume de 100% de cada uma das albufeiras de Goose Creek, South Fork, Oros e Castlewood.

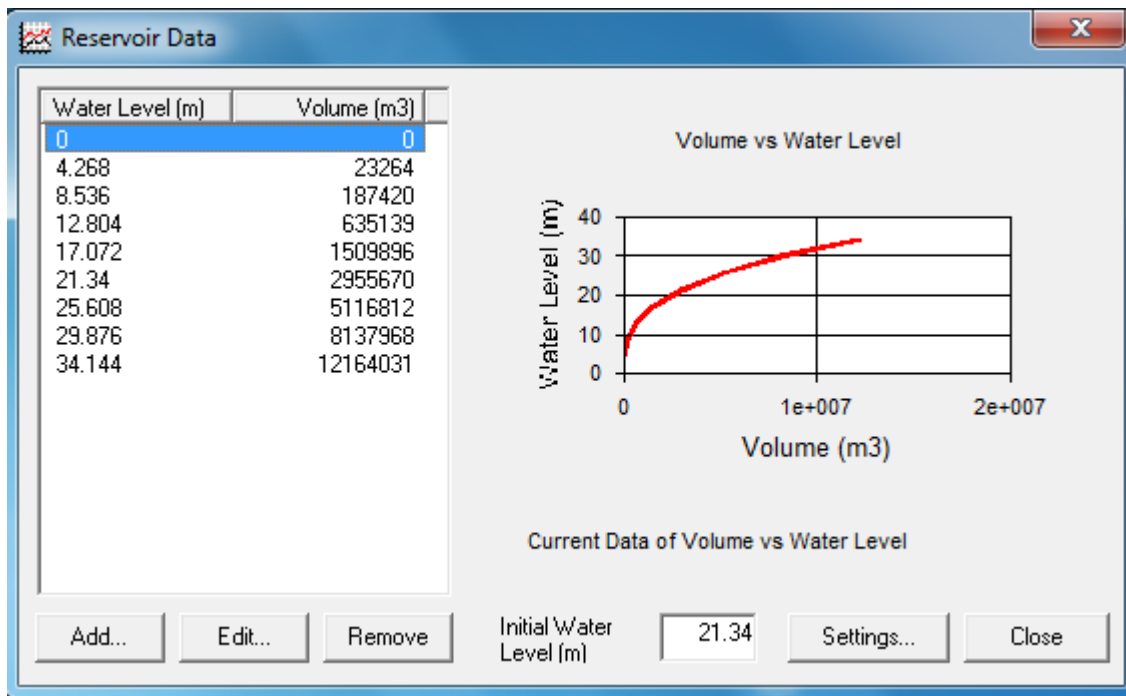


Figura 4.7 – Imagem de exemplo de curva de volumes no modelo RoDaB

São introduzidas as características de cada uma das barragens (cota, largura e comprimento do coroamento, e igualando o comprimento do vale ao comprimento do coroamento) (figura 4.8) e as características da brecha, bem como o tipo de ruptura (por galgamento) e o método a ser utilizado no desenvolvimento da brecha (racional) (figura 4.9).

Figura 4.8 – Imagem de exemplo das características da barragem no modelo RoDaB

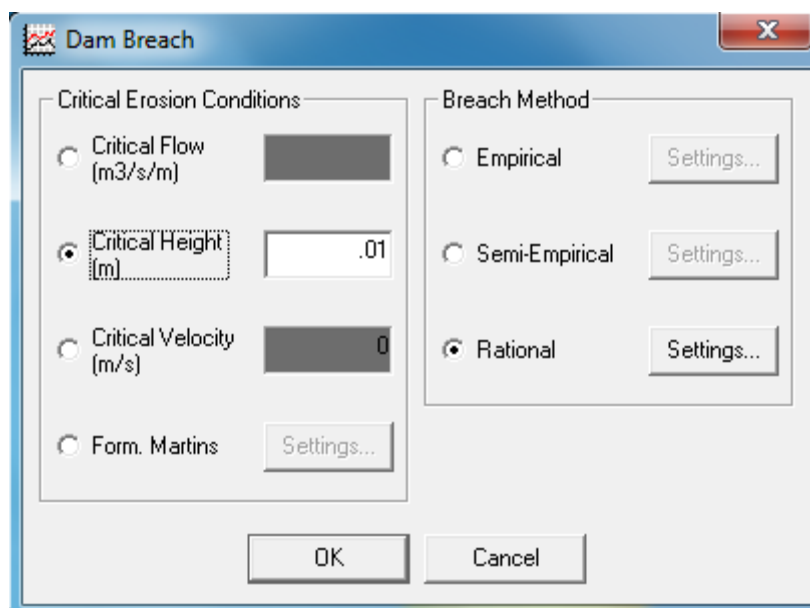


Figura 4.9 – Imagem de exemplo da selecção do tipo de ruptura e do método de evolução da brecha no modelo RoDaB

Após a selecção do modelo de evolução da brecha, temos que ajustar as configurações em função de cada uma das combinações referidas no quadro 4.3 tendo em conta a largura média da brecha de cada uma das barragens em estudo.

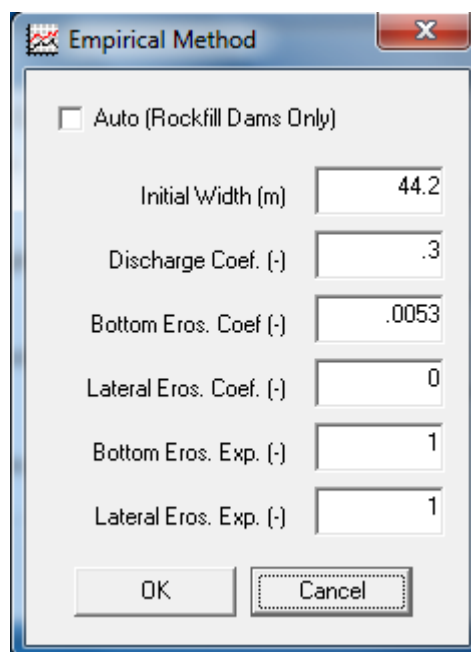


Figura 4.10 – Imagem de exemplo da introdução dos coeficientes de erosão da brecha e da largura média da mesma

Depois de correr o modelo RoDaB retiramos a informação pretendida tanto através da análise gráfica e/ou de uma folha de cálculo que é exportada a partir do programa estando em formato tipo xls.

### 4.6.3 Proposta de Classificação de Albufeiras

Após encontrar o volume de albufeira onde se sugeriu que fosse o limite de “grande” e “pequena” albufeira e utilizando as expressões (4.34) e (4.35) foi calculado o valor de  $n^*$ , em função do volume da albufeira e da altura da barragem, e o valor de  $\alpha^*$  em função também da altura da barragem e dos parâmetros da brecha (coeficiente de vazão da brecha, largura média da brecha e coeficiente e expoente de erosão da brecha).

Após a recolha e organização dos dados e resultados pretendidos nas 96 barragens (fictícias), apresentados em anexo, procedeu-se à sua análise com vista a encontrar uma fronteira através da qual fosse possível classificar o perigo associado ao conjunto barragem/albufeira. Utilizando os resultados (Anexo A) de  $\alpha^*$  em função de  $n^*$ , inseridos num gráfico, e recorrendo a uma linha de tendência baseada numa regressão não-linear, a solução obtida para a proposta de limite entre “grande” e “pequena” albufeira é a representada na figura seguinte:

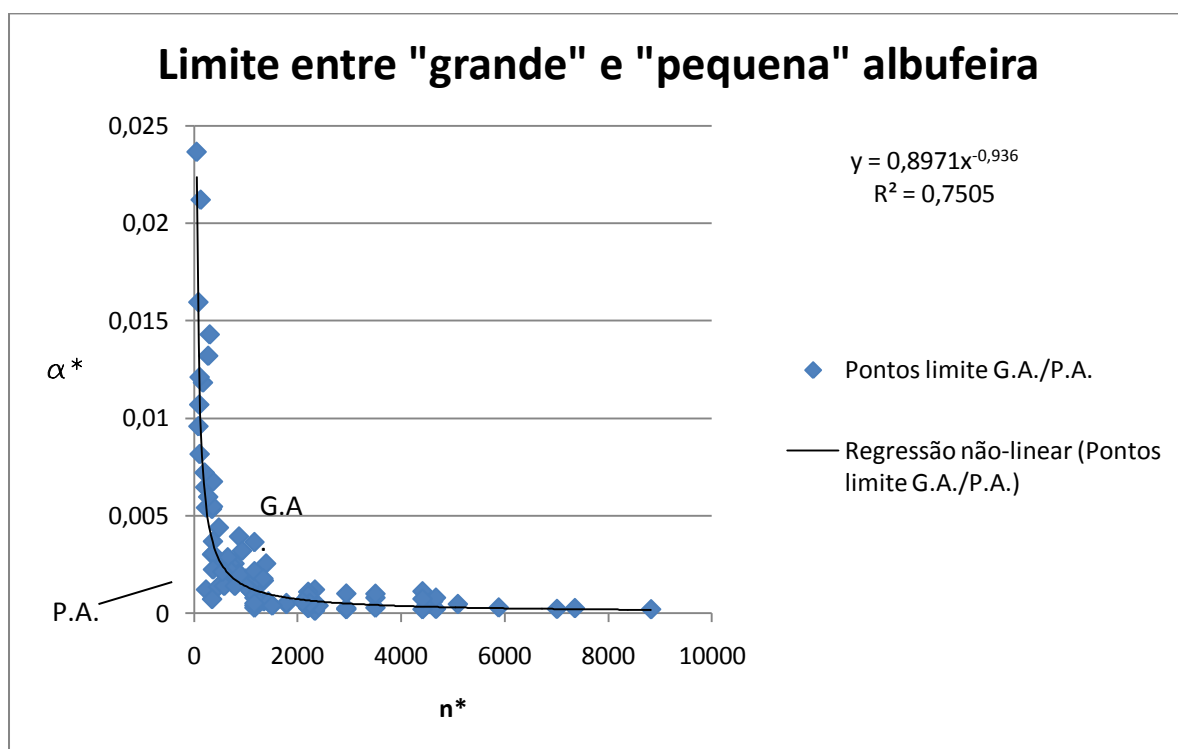


Figura 4.11 – Resultado gráfico da análise computacional do limite entre “pequena” e “grande” albufeira

Da análise deste gráfico foi retirada uma linha de tendência que representa a proposta de limite entre “grande” e “pequena” albufeira. Acima dessa linha estamos perante uma albufeira “grande”/erosão rápida e abaixo da mesma estamos perante uma albufeira “pequena”/erosão lenta.

Apresenta-se a expressão que permite fazer tal avaliação, representada na figura 4.11:

$$\alpha^* = 0,8971 \cdot n^{*-0,936} \quad (4.40)$$

Em que

$$\mu^* = \alpha^* \cdot n^* = 0,8971 \cdot n^{*1-0,936} \quad (4.41)$$

## 4.7 Caudal Máximo Efluente

O estudo de uma expressão geral para estimação do caudal máximo efluente foi feito com base na análise dos resultados de caudal máximo obtido nas simulações para o qual se obteve a proposta de limite entre “pequena” e “grande” albufeira feitas anteriormente.

Considerando que o caudal máximo efluente depende apenas das variáveis cinemáticas, aceleração gravítica ( $g$ ), altura da barragem ( $h_D$ ), largura média da brecha ( $W_f$ ) e coeficiente de vazão da brecha ( $C_v$ ), tem-se:

$$Q_{max} = f(g, h_D, W_f, C_v) \quad (4.42)$$

Tomando as variáveis dimensionalmente independentes  $g$  e  $h_D$  como variáveis básicas, por aplicação do teorema de Vaschy-Buckingham obtém-se a seguinte expressão adimensional regente do fenómeno em função de  $Q^*$  (4.36):

$$Q^* = \frac{Q_{max}}{h_D^{5/2} \cdot g^{1/2}} = f\left(\frac{C_v}{\sqrt{g}}; \frac{W_f}{h_D}\right) \quad (4.42)$$

Para relacionar os três parâmetros adimensionais de expressão adimensional, procede-se a uma regressão linear múltipla (Chapra e Canale, 1998).

Uma extensão útil da regressão linear é o caso onde  $y$  é uma função linear de 2 ou mais variáveis independentes. Por exemplo,  $y$  pode ser uma função linear em  $x_1$  e em  $x_2$  como se apresenta de seguida. Com base na equação seguinte:

$$y_i = a_0 + a_1 \cdot x_{1,i} + a_2 \cdot x_{2,i} \quad (4.43)$$

Uma equação deste tipo é particularmente útil quando se quer ajustar dados experimentais onde a variável em estudo é normalmente função de duas outras variáveis. Para este caso, bidimensional, a linha de regressão torna-se um plano.

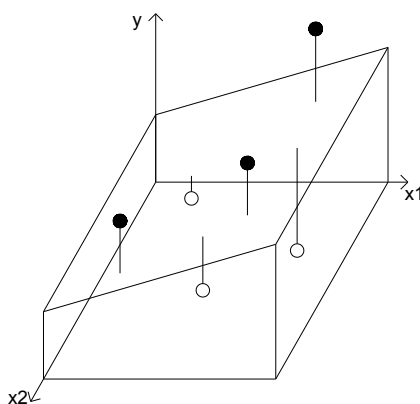


Figura 4.12 – Exemplo do plano obtido com uma regressão linear bidimensional

Os melhores valores dos coeficientes são determinados através da criação do somatório ao quadrado dos valores do resíduo.

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i})^2 \quad (4.44)$$

e derivando em função de cada um dos coeficientes tem-se:

$$\frac{dS_r}{da_0} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}) \quad (4.45)$$

$$\frac{dS_r}{da_1} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}) \quad (4.46)$$

$$\frac{dS_r}{da_2} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n x_{2i} \cdot (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}) \quad (4.47)$$

Os coeficientes são obtidos igualando as derivadas parciais a zero e exprimindo o resultado na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i} \cdot x_{2i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i} \cdot x_{2i} & \sum x_{2i}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i \cdot x_{1i} \\ \sum y_i \cdot x_{2i} \end{Bmatrix} \quad (4.48)$$

Com os valores do coeficiente de vazão e largura média da brecha, altura da barragem, e do caudal adimensional calculado com base na expressão (4.35), utilizando o caudal máximo simulado no modelo RoDaB foram calculados os termos referidos na matriz e obteve-se assim o seguinte resultado:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,0533 \\ 0,3081 \\ 2,7536 \end{bmatrix} \quad R^2 = 0,883$$

Com:

$$- x_{1,i} = \frac{W_f}{h_D},$$

$$- x_{2,i} = \frac{C_v}{\sqrt{g}},$$

$$- y_i = Q^*$$

-  $n$  – número de objectos/simulações

Fica-se com

$$Q^* = a_0 + a_1 \cdot \frac{W_f}{h_D} + a_2 \cdot \frac{C_v}{\sqrt{g}} \quad (4.43a)$$

e substituindo então para o cálculo do caudal adimensional fica:



$$Q^* = -1,0533 + 0,3081 \cdot \frac{W_f}{h_D} + 2,7536 \cdot \frac{C_v}{\sqrt{g}} \quad (4.43b)$$

utilizando então este valor para o cálculo do caudal máximo efluente sugerido na expressão (4.36).



## 5 Aplicação a Casos de Estudo

### 5.1 Breve apresentação das barragens em estudo

#### 5.1.1 Barragem do Sabugal

A Barragem do Sabugal situa-se no concelho do Sabugal, distrito da Guarda, na Bacia Hidrográfica do Douro e abrange uma área de cerca de 13000 ha, sendo a área inundada de cerca de 692 ha. As actividades da Albufeira do Sabugal são o abastecimento, produção de energia eléctrica e a rega, com recurso ao sistema hidráulico Sabugal-Meimoa

São apresentadas de seguida as características da barragem utilizadas no modelo RoDaB obtidas através da base de dados de barragens da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens disponível no sítio electrónico <http://cnpgb.inag.pt>:

Quadro 5.1 – Características gerais da barragem do Sabugal

Barragem	Volume da albufeira (hm <sup>3</sup> )	Altura acima do terreno natural (m)	Comprimento do coroamento (m)	Largura do coroamento admitido (m)
Sabugal	114,3	56,5	1005	8

#### 5.1.2 Barragem de Vale do Gaio

Com uma bacia hidrográfica que se estende por 509 km<sup>2</sup>, a barragem Engenheiro Trigo de Morais, mais conhecida, por barragem de Vale do Gaio, entrou em funcionamento em 1949, localizando-se a albufeira, então criada, na ribeira de Xarrama (bacia hidrográfica do Sado), concelho de Alcácer do Sal – situando-se o seu Nível de Pleno Armazenamento (NPA) à cota 40,5. O uso principal desta albufeira é a rega, encontrando-se a sua gestão atribuída a uma associação de regantes.

São apresentadas de seguida as características da barragem utilizadas no modelo RoDaB obtidas através da base de dados de barragens da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens disponível no sítio electrónico <http://cnpgb.inag.pt>:

Quadro 5.2 – Características gerais da barragem de Vale do Gaio

Barragem	Volume da albufeira (hm <sup>3</sup> )	Altura acima do terreno natural (m)	Comprimento do coroamento (m)	Largura do coroamento (m)
Vale do Gaio	63,0	34	368	6

#### 5.1.3 Barragem de Malhada do Peres

Situada no concelho de Tavira, freguesia de St<sup>a</sup>. Maria de Tavira e Conceição, a barragem de Malhada do Peres foi construída com a finalidade de armazenamento de água para rega dos campos circundantes num perímetro de 56 ha.

São apresentadas de seguida as características da barragem utilizadas no modelo RoDaB obtidas através da base de dados de barragens da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens disponível no sítio electrónico <http://cnpgb.inag.pt>:

Quadro 5.3 – Características gerais da barragem de Malhada do Peres

Barragem	Volume da albufeira (hm <sup>3</sup> )	Altura acima do terreno natural (m)	Comprimento do coroamento (m)	Largura do coroamento (m)
Malhada do Peres	0,46	22	151,5	7

#### 5.1.4 Barragem de Vaqueiros

A Barragem de Vaqueiros situa-se no concelho de Alcoutim, freguesia de Vaqueiros, no barranco das Hortas, que é um afluente da ribeira da Foupana, pertencendo à bacia do Guadiana. Mais precisamente, localiza-se cerca de 300 m para sudeste da povoação de Vaqueiros.

Trata-se de uma barragem de terra zonada, com núcleo central argiloso e maciços estabilizadores em solos silto-argilosos provenientes da alteração de xistos e grauvaques. A obra foi construída com a finalidade de armazenar água para a rega dos campos circundantes à barragem numa área de 35 ha, sendo o Dono da Obra a Direcção Regional de Agricultura do Algarve (Rodrigues, 2006).

São apresentadas de seguida as características da barragem utilizadas no modelo RoDaB obtidas através da base de dados de barragens da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens disponível no sítio electrónico <http://cnpgb.inag.pt>:

Quadro 5.4 – Características gerais da barragem de Vaqueiros

Barragem	Volume da albufeira (hm <sup>3</sup> )	Altura acima do terreno natural (m)	Comprimento do coroamento (m)	Largura do coroamento (m)
Vaqueiros	0,241	16	239,5	6

#### 5.1.5 Barragem de Santa M<sup>a</sup> de Aguiar

Situada no concelho de Figueira de Castelo Rodrigo, freguesia de Almofala, a barragem de Santa M<sup>a</sup> de Aguiar, também pertencente à acia Hidrográfica do Douro, feita em terra batida em 1979, destina-se ao abastecimento de todas as freguesias do concelho.

São apresentadas de seguida as características da barragem utilizadas no modelo RoDaB obtidas através da base de dados de barragens da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens disponível no sítio electrónico <http://cnpgb.inag.pt>:

Quadro 5.5 – Características gerais da barragem de Santa M<sup>a</sup> de Aguiar

Barragem	Volume da albufeira (hm <sup>3</sup> )	Altura acima do terreno natural (m)	Comprimento do coroamento (m)	Largura do coroamento assumido (m)
Santa M <sup>a</sup> de Aguiar	5,4	20	450	6

## 5.2 Classificação de Albufeiras

Utilizando a base de dados de barragens Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens foram retirados alguns parâmetros do conjunto barragem-albufeira como descrito no subcapítulo anterior, com vista a inseri-los no RoDaB, e, considerando as equações (4.34) e (4.35), referentes ao cálculo dos parâmetros  $\alpha^*$ ,  $n^*$  e  $\mu^*$ , poderemos classificar as mesmas a nível de perigosidade, consoante a proposta antes referida.

Para o tipo de evolução da brecha foi utilizado o modelo racional e para a geometria da secção da mesma, foi utilizado o caso particular da sua evolução em secção rectangular, referidos anteriormente nos subcapítulos (3.3.4) e (4.3), respectivamente, como forma de tentar obter resultados mais próximos dos obtidos nas barragens já estudadas, pois é nessa forma é que é baseada a parametrização do tipo de albufeira.

Para os parâmetros de evolução da brecha foram utilizados os seguintes valores médios:

- Coeficiente de erosão do fundo da brecha ( $C_{s,b}$ ) = 0,0025 ( $m^{1-\beta_{s,b}} s^{-1+\beta_{s,b}}$ )
- Expoente de erosão do fundo da brecha ( $\beta_{s,b}$ ) = 2 (-)
- Coeficiente de vazão da brecha ( $C_v$ ) = 2,21 ( $m^{1/2} s^{-1}$ )

Como já foi mencionado, a geometria rectangular da brecha de largura constante tem a particularidade da taxa de erosão lateral da brecha ser nula, e portanto para a largura média da brecha foi adoptada uma relação proposta por Froehlich (1995b), baseada em 63 casos de estudo, apresentada de seguida:

$$W_f = \bar{B} = 0,1803 K_0 V_W^{0,32} h_D^{0,19} \quad (5.1)$$

Com  $K_0=1,4$  para galgamento; 1,0 para outros casos.

De seguida são apresentadas as barragens em estudo, com as respectivas características físicas e os respectivos valores dos parâmetros adimensionais, antes referidos, já calculados, para as quais se fez o estudo da classificação de perigosidade. A proposta de classificação das barragens em estudo foi feita recorrendo ao seguinte método: o valor de  $\mu$  é calculado com recurso às expressões (4.34) e (4.35) com base nas características do conjunto barragem/albufeira e nos parâmetros de evolução da brecha atrás referidos. O valor de  $\mu^*$  é calculado com o recurso à expressão (4.41) calculando o  $n^*$  através da expressão (4.34). A proposta de classificação do conjunto barragem/albufeira é feita com base numa simples análise:

- para  $\mu > \mu^*$  o conjunto é classificado como grande albufeira/erosão rápida;
- para  $\mu < \mu^*$  o conjunto é classificado como pequena albufeira/erosão lenta.

Quadro 5.6 – Proposta de classificação das barragens em estudo

Barragem	Volume (hm <sup>3</sup> )	$h_D$ (m)	$W_f$ (m)	$A_R$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha^*$	$n^*$	$\mu$	$\mu^*$	Proposta
Sabugal	114,3	56,50	205,87	2023009	0,0114	633,73	7,223	2,013	G.A./E.R.
Vale do Gaio	63,0	34,00	154,49	1852941	0,0071	1602,9	11,365	1,440	G.A./E.R.

Barragem	Volume (hm <sup>3</sup> )	h <sub>D</sub> (m)	W <sub>f</sub> (m)	A <sub>R</sub> (m <sup>2</sup> )	$\alpha^*$	n*	$\mu$	$\mu^*$	Proposta
Malhada do Peres	0,46	22,00	29,46	20909	0,0194	43,20	0,0834	1,142	P.A./E.L.
Vaqueiros	0,241	16	22,55	15063	0,0157	58,84	0,9226	1,164	P.A./E.L.
Santa M <sup>a</sup> de Aguiar	5,40	20	63,63	270000	0,0078	675,0	5,242	1,361	G.A./E.R.

Nas seguintes figuras é apresentado o resultado gráfico das simulações realizadas no RoDaB para cada uma das barragens em estudo onde, após análise dos mesmos, se pode ter uma ideia do tipo de perigosidade da albufeira, consoante foi proposto.

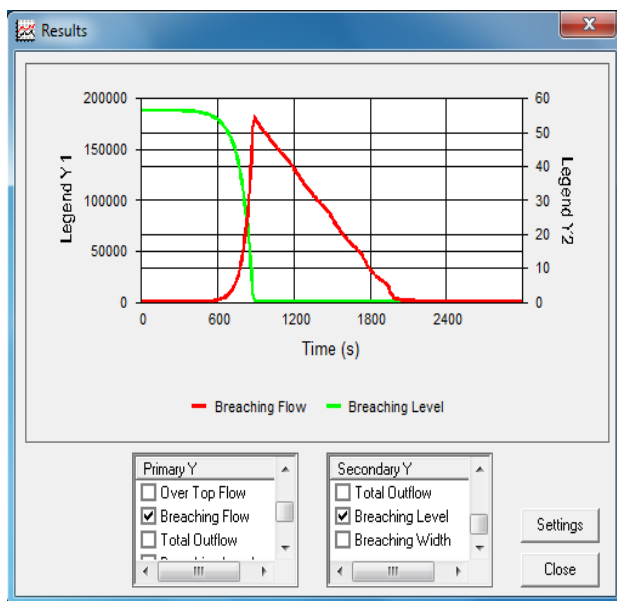


Figura 5.1 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem do Sabugal

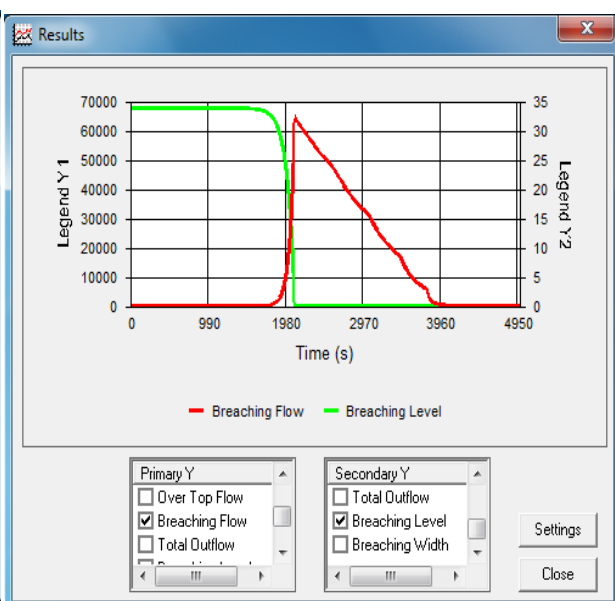


Figura 5.3 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem do Vale do Gaio

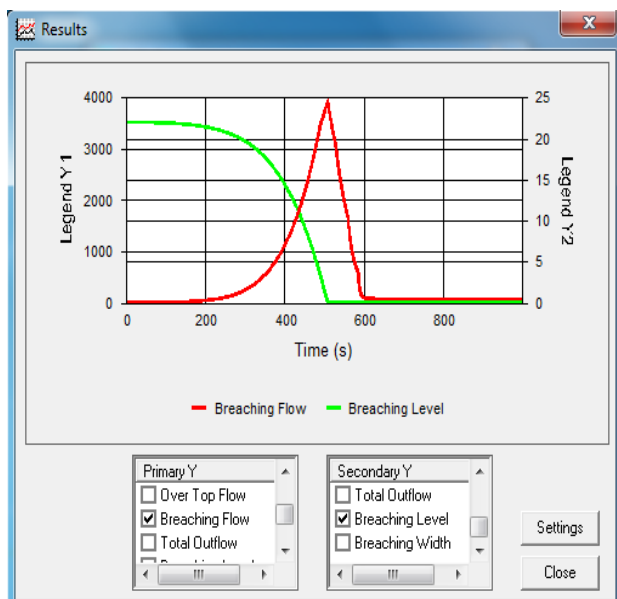


Figura 5.2 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem da Malhada do Peres

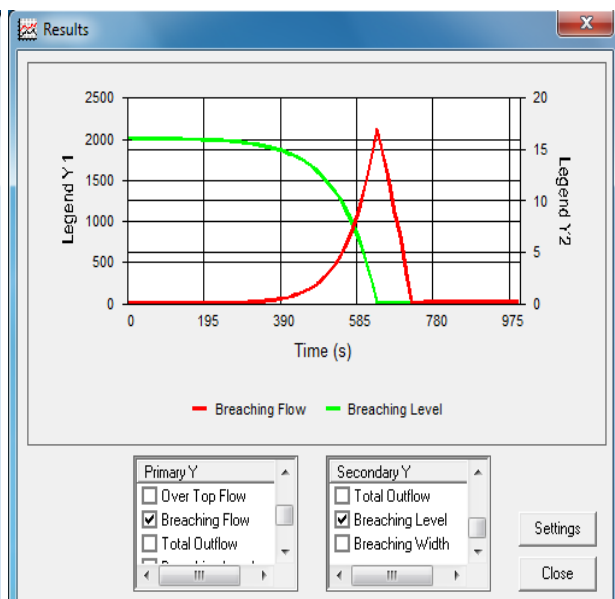


Figura 5.4 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem de Vaqueiros

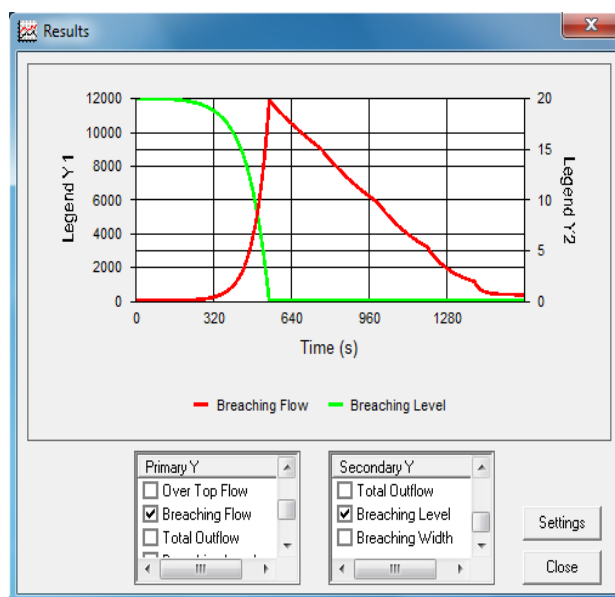


Figura 5.5 – Resultado da simulação realizada no RoDaB para a barragem de Santa M<sup>a</sup> de Aguiar

De seguida são apresentados os resultados graficamente com a linha/equação que delimita a fronteira entre grande e pequena albufeira.

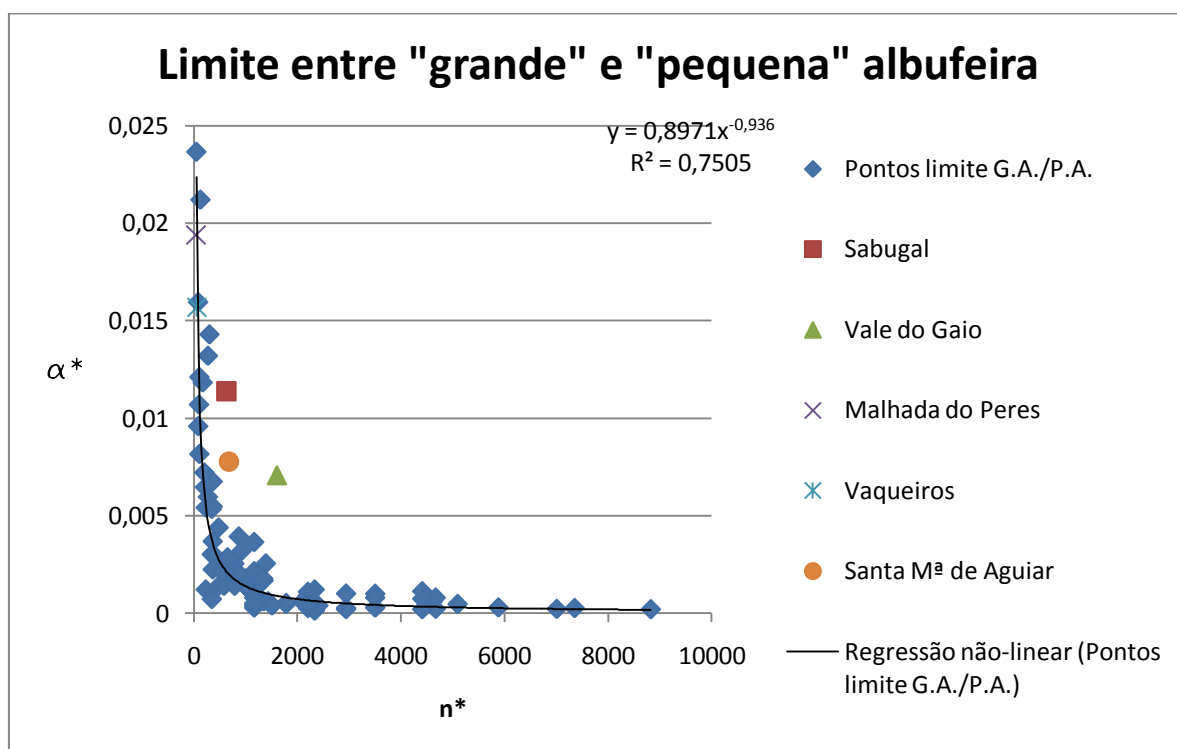


Figura 5.6 – Análise gráfica do perigo em caso de ruptura das barragens estudadas

Como se pode perceber na figura anterior, as barragens do Sabugal, Vale do Gaio e Santa M<sup>a</sup> de Aguiar encontram-se acima da linha da equação proposta como limite entre “grande” e “pequena” albufeira, logo serão classificadas com um nível de perigosidade maior em caso de ruptura, pois a rapidez de erosão da brecha será maior. Abaixo da mesma linha de proposta como limite entre “grande” e “pequena” albufeira, tem-se as barragens de Malhada do Peres e a de Vaqueiros, e serão assim classificadas com um nível de perigosidade inferior em caso de ruptura, pois a rapidez de erosão da brecha será menor.

### 5.3 Caudal Máximo Efluente

Este subcapítulo tem como objectivo fazer a comparação de valores de caudais máximos fornecidos pelo RoDaB, com os valores de cálculo através da expressão (4.43b) e (4.36).

Utilizando, na análise analítica, os mesmos dados do conjunto barragem-albufeira e parâmetros de erosão da brecha inseridos na análise computacional e recorrendo a expressão (4.43b) foi calculado o caudal adimensional em função da altura e dos parâmetros da brecha de cada uma das barragens em estudo, obtendo os seguintes resultados:

Quadro 5.7 – Resultados do caudal adimensional para cada barragem

Barragem	$W_f$	$h_D$	$C_v$	$Q^*$
Sabugal	205,87	56,5	2,21	2,013
Vale do Gaio	154,49	34,0	2,21	2,291
Malhada do Peres	29,46	22,0	2,21	1,303
Vaqueiros	22,55	16,0	2,21	1,325
Santa M <sup>a</sup> de Aguiar	63,63	20,0	2,21	1,871

Através da expressão (4.36) e do caudal adimensional calculado antes, obteve-se o valor do caudal máximo:

Quadro 5.8 - Resultados do caudal máximo para cada barragem para métodos analítico e computacional

Barragem	$h_D$	$Q^*$	$Q_{\max}(\text{analítico})$	$Q_{\max}(\text{RoDaB})$
Sabugal	56,5	2,013	151227	182887
Vale do Gaio	34,0	2,291	48334	65339
Malhada do Peres	22,0	1,303	9262	3920
Vaqueiros	16,0	1,325	4247	1932
Santa M <sup>a</sup> de Aguiar	20,0	1,871	10477	11881

Como se pode verificar no quadro anterior na barragem do Sabugal temos uma diferença de caudal máximo de cerca de 17% inferior no modelo computacional em relação ao método analítico. Na barragem de Vale do Gaio esta diferença situa-se na ordem dos 26%, na barragem de Malhada do Peres é de cerca de 136%, na barragem de Vaqueiros é de 120% e na barragem de Santa M<sup>a</sup> de Aguiar temos uma ligeira diferença na ordem do 12%.

Apesar das diferenças nas estimações de caudal máximo, a ordem de grandeza destes é aproximada indicando que a parametrização proposta fornece valores aceitáveis para uma análise expedita da perigosidade das estruturas.



## 6 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 6.1 Conclusões

O presente trabalho permitiu realizar tanto a classificação do conjunto barragem/albufeira como também a previsão do caudal máximo efluente com recurso a simples análises, como conhecimento prévio das características desse mesmo conjunto e dos parâmetros de evolução da brecha.

A adopção da geometria de evolução de brecha rectangular com largura constante é uma aproximação plausível, no sentido em que o mais importante numa avaliação simplificada de perigosidade de uma barragem é a secção disponível ao escoamento. Adoptando uma largura média da brecha do topo ao fundo da barragem, com base em estudos já realizados, o que temos que ter em conta, será apenas a altura da barragem, com variável geométrica dependente do tempo.

As simulações feitas no modelo RoDaB revelaram-se de grande importância na obtenção dos valores de volumes para os quais uma barragem estaria no limite entre grande e pequena albufeira, tendo-se o programa revelado útil para este tipo de análise.

A utilização da combinação dos parâmetros de erosão da brecha utilizados consegue cobrir uma vasta gama e diversidade de condições existentes, tornando assim os resultados da linha de tendência obtida nos parâmetros de classificação de albufeiras aceitáveis para serem utilizadas em outras barragens. Através da utilização dos parâmetros de classificação de albufeiras propostos, observou-se uma linha de tendência aceitável, tendo conta que na expressão obtida, o desvio padrão está dentro de um erro também considerado como aceitável.

A forma de estimar o caudal máximo efluente é feita recorrendo ao cálculo de um caudal adimensional que se relevou complexo considerando o tipo de dependência. Com o recurso aos resultados obtidos nas simulações feitas, e recorrendo a uma regressão linear bidimensional obteve-se uma proposta de cálculo desse mesmo caudal adimensional.

A proposta de cálculo do caudal máximo efluente comparada com os valores dados pelo RodaB tem uma boa aproximação no que diz respeito a barragens classificadas como “grandes”, tendo em conta que das barragens estudadas, essa diferença está compreendida entre os 12% e 26% e sempre com os valores inferiores. No caso das barragens classificadas como pequenas, essa diferença excede os 100%, 120% e 136% nas barragens de Malhada do Peres e de Vaqueiros, respectivamente, tendo valores sempre superiores aos simulados no RoDaB, tal devendo-se eventualmente à maior dependência do hidrograma de cheia face aos parâmetros de desenvolvimento da brecha.

### 6.2 Desenvolvimentos Futuros

Sugerem-se de seguida algumas propostas e melhorias a realizar em trabalhos posteriores que poderão ser objecto de desenvolvimentos futuros.

- Realização do estudo de mais barragens com vista a fazer a respectiva calibração em função dos parâmetros de erosão da brecha, procurando de seguida o limite proposto entre grande e pequena albufeira com o objectivo de realizar e comparar uma nova proposta de linha delimitadora da classificação de albufeiras com base em características de conjuntos barragem-albufeira reais;

- Estudo de mais barragens com vista ao cálculo e comparação, com o modelo RoDaB, do caudal máximo efluente, de forma a compreender se os valores simulados em conjuntos barragem/albufeira grandes são sempre superiores aos calculados analiticamente, e se os valores simulados em conjuntos barragem/albufeira pequenos são sempre inferiores;
- Realização do mesmo estudo utilizando um modelo computacional diferente do RoDaB, que permita também a evolução da brecha e a introdução da curva de volumes, nas mesmas condições que as utilizadas no presente estudo;
- Realização do mesmo estudo com ensaios laboratoriais em modelo de forma a fazer a comparação com o estudo realizado, quer em termos de classificação do conjunto barragem/albufeira, quer em termos de caudal máximo efluente.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- Almeida, A. B. 2001.** *Emergências e Gestão do Risco, in INAG, Curso de Exploração e Segurança de Barragens.* INAG - Instituto da Água : Lisboa, 2001.
- Babb, A., e Mermel, T. 1968.** *Catalog of Dam Disasters, Failures and Accidents, PBI79243.* Washington, D.C (Bureau of Reclamation). : s.n., 1968.
- Bechteler, W. e Broich, K. 1993.** *Computational Analysis of the Dam Erosion Problem.* Proceedings of the International Conference on Hydrosience and Engineering : Washington DC,, 1993.
- Biswas, A. K. e Chatterjee, S. 1971.** *Dam Disasters: An Assessment.* 1971.
- Broich, K. 1999.** *An Overview of Breach Modelling.* 1999.
- Broich, K. 1998.** *Mathematical Modelling of Dambreak Erosion Caused by Overtopping.* Proceedings of the 2nd CADAM Workshop : Munich, 1998.
- Brown, R. J. e C., Rogers D. 1977.** *A Simulation of the Hydraulic Events During and Following the Teton Dam Failure, Proceedings of the Dam-Break Flood Routing Workshop.* Washington DC : s.n., 1977.
- CADAM. 2000.** *Concerted Action on Dambreak Modelling- Final Report.* 2000.
- Chapra, S. T. e Canale, R.P. 1998.** *Numerical Methods for Engineers.* pag. 460-461 : s.n., 1998.
- Coleman, S. E., Jack, R. C. e Melville, B. W. 1997.** *Overtopping Breaching of Noncohesive Embankment Dams, Proceedings of the 27th Congress on the IAHR - Energy and Water: Sustainable Development.* São Francisco : s.n., 1997.
- Coleman, S., Andrews, D., e Webby, M. 2002.** *Overtopping breaching of non-cohesive homogeneous embankments.* Journal of Hydraulic Engineering , 128, nº9, 829-838. : s.n., 2002.
- Coleman, S.E, Jack, R.C. e Melville, B.W. 1997.** *“Overtopping breaching of noncohesive embankment.* Proc. 27th Congress on the IAHR – Energy and Water: Sustainable Development : S. Francisco (EUA), 1997.
- Costa, J. E. 1985.** *Floods from Dam Failures, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560.* Denver, Colorado : s.n., 1985.
- Cristofano, E.A. 1965.** *Method of Computing Erosion Rate for Failure of Earthfill Dams.* U. S. Bureau of Reclamation, Denver : s.n., 1965.
- Dewey, R., e Gillette, D. 1993.** *Prediction of Embankment Dam Breaching for Hazard Assessment, Proceedings. Carolina do Norte: ASCE Specialty Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation.* Raleigh : s.n., 1993.
- Exner, F. 1925.** *Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe.* Flüssen, Academia das Ciências Austríaca. : s.n., 1925.

**Foster, M., Fell, R., e Spannagle, M. 2000.** *The statistics of embankment dam failures and accidents.* Canadian Geotechnical Journal , 1000-1024, 37. : s.n., 2000.

**Franca, M. 2002.** *Caracterização e modelação numerica e experimental da ruptura provocada por galgamento de barragens de enrocamento.* Dissertação submetida para a obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos pelo I.S.T. da Universidade Técnica de Coimbra : Lisboa, 2002.

**Franca, M. e Almeida, A. 2004.** *A computational model of rockfill dam breaching caused by overtopping (RoDaB).* Journal of Hydraulic Research , Vol. 42, No. 2 197-206. : s.n., 2004.

**Franca, M., e Almeida, A. 2004.** *Abordagem analítica do fenómeno de ruptura de barragens: determinação do caudal máximo e classificação de albufeiras.* Actas do XXI Cong. Latinoamericano Hidr. : S. Paulo, Brazil, 2004.

**Franca, M., e Almeida, A. 2002.** *Experimental Tests on Rockfill Dam Breaching Process.* Proc. IAHR Int. Symp. Hydr. Hydro. Aspects of Reliability and Safety Assessment of Hydraulic Structures : S.Petersburg, 2002.

**Fread, D. L. 1984.** *A Breach Erosion Model for Earthen Dams, National Weather Service.* 1984.

**Froehlich, D. C. 1995b.** *Embankment Dam Breach Parameters Revisited, Water Resources Engineering. Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering, (pp. 887-891).* San Antonio, Texas. : s.n., 1995.

**Froehlich, D. C. 1987.** *Embankment-Dam Breach Parameters, Proceedings of National Conference on Hydraulic Engineering.* ASCE, Nova Iorque. : s.n., 1987.

**Froehlich, D. C. 1995a.** *Peak Outflow from Breached Embankment Dam. Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering, (pp. 887-891).* San Antonio, Texas : s.n., 1995.

**Garcia, C. 2011.** *Parameterização e validação do modelo computacional de brechas em barragens de aterro RoDaB.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção : Almada, 2011.

**Graf, W. H. e Altinakar, M. S. 1998.** *Fluvial Hydraulics – Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry, John Wiley & Sons.* Sussex : s.n., 1998.

**Graham, W. 1983.** *Physical and Breach Parameters for Dams with Large Storage to Height, unpublished internal document.* Denver, Colorado: U.S. Bureau of Reclamation. : s.n., 1983.

**Hanson, G., Temple, D. e Cook, K. 1999.** *Dam overtopping resistance and breach processes research.* Proc. 1999 Annual Conf. Association of State Dam Safety Officials, St. Louis, Missouri, USA, (CD-ROM) : s.n., 1999.

**Harris, G. W. e Wagner, D .A. 1967.** *Outflow from Breached Earth Dams.* Dissertação de B.Sc : University of Utah, Salt Lake City (não publicado), 1967.

**ICOLD. 2003.** *International Commission On Large Dams - World Register of Dams.* 2003.

**INAG. 1992.** CNPGB. *Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens.* [Online] 1992. [http://cnpgb.inag.pt/gr\\_barragens/gbportugal/Mapaescolha.htm](http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Mapaescolha.htm).

- Johnson, F. e Illes, P. 1976.** *A Classification of Dam Failures, Water Power and Dam Construction*, Vol. 28(12), p. 43-45. 1976.
- Lorenzo, G. e Macchione, F. 2010.** *Simulation of floods due to rockfill dam breaching*. 2010.
- Lou, W. C. 1981.** *Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches*. Dissertação de Doutorado : Colorado State University – Fort Collins (não publicado, 1981).
- Loukola, E. e Huokuna, M. 1998.** *A Numerical Erosion Model for Embankment Dams Failure and It's Use for Risk Assessment*. Proceedings of the 2nd CADAM Workshop : Munich, 1998.
- MacDonald, T. e Langridge- Monopolis, J. 1984.** *Breaching Characteristics of Dam Failures*, J. Hydraulic Eng. 1984.
- Martins, R. 1981.** *Hydraulics of Overflow Rockfill Dams*. LNEC – Me 559 : Lisboa, 1981.
- Stateler, J. N. 1997.** *Performance Parameter Evaluation of Potential Hydraulic Structure Failure Modes, Proceedings of Energy and Water: Sustainable Development*. São Francisco : s.n., 1997.
- NC. 1998.** *Normas de Construção*. Portaria 246/98, de 21.04.1998 : s.n., 1998.
- Nogueira, V. D. 1984.** *A Mathematical Model of Progressive Earth Dam Failure*. Dissertação de Doutorado : Colorado State University – Fort Collins (não publicado), 1984.
- NOIB. 1993.** *Normas de Observação e Inspeção de Barragens*. Portaria 847/93, de 10.09.1993 : s.n., 1993.
- NPB. 1993.** *Normas de Projecto de Barragens*. Portaria nº. 846/93 de 10 de Setembro. : s.n., 1993.
- Ponce, V. M. e Tsivoglou, A. J. 1981.** *Modeling Gradual Dam Breaches*. Journal of Hydraulics Division, Vol. 107, N. HY7, 829-838 : s.n., 1981.
- Powledge, G., Powledge, G. R., Ralston D. C., Miller, P., Chen, Y. H., Clopper, P. E. e Temple, D. M. 1989.** *Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. I: Research Activities*. 1989.
- Powledge, G., Ralston, D., Miller, P., Chen, Y., Clopper, P., e Temple, D. 1989b.** *Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II: Hydraulic and Design Considerations*. 1989.
- Reclamation, USBR - U.S. Bureau of. 1988.** *Downstream Hazard Classification Guidelines ACER Technical Memorandum No. 11, Assistant Commissioner-Engineering and Research*. Denver, Colorado : s.n., 1988.
- Rodrigues, H. M. H.. 2006.** *Controlo de segurança hidráulico operacional em barragens de aterro*. s.l. : Faro, 2006.
- RPB. 1993.** *Regulamento de Pequenas Barragens*. Dec. Lei 409/93, de 14.12.1993 : s.n., 1993.
- RSB. 2007.** *Regulamento de Segurança de Barragens*. Dec. Lei 344/2007, de 15 de Outubro : s.n., 2007.
- Sá, L. 2007** *Regulamento de Segurança de Barragens e a Protecção Cível*.

**Serafim, J. L. 1981.** *Safety of Dams Judged from Failures, Water Power and Dams Construction*. 1981.

**Singh. 1996.** *Dam Breach Modeling Technology*. 1996.

**Singh, K., e Snorrason, A. 1982.** *Sensitivity of Outflow Peaks and Flood Stages to the Selection of Dam Breach Parameters and Simulation Models, SWS Contract Report 288. Illinois Department of Energy and Natural Resources State Water Survey Division. Surface Water Section at the University of Illinois : s.n., 1982.*

**Singh, V.P. e Scarlatos, P.D. 1988.** “*Analysis of gradual earth-dam failure*”. *Journal of Hydraulic Engineering* 114, 1 : s.n., 1988.

**Stateler, J. N. 1997.** *Performance Parameter Evaluation of Potential Hydraulic Structure Failure Modes, Proceedings of Energy and Water: Sustainable Development*. São Francisco : s.n., 1997.

**Stephenson, D. 1979.** *Rockfill in Hydraulic Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company*., Amsterdão : s.n., 1979.

**Tingsanchali, T. e Chinnarasri, C. 2001.** *Numerical modeling of dam failure due to flow overtopping*. *Hydrological Sciences Journal* , 46(1) Fevereiro, 2001.

**Tsakiris, G., Bellos, V. e Ziogas, C. 2010.** *Embankment Dam Failure: A Downstream Flood Hazard Assessment*. 2010.

**Visser, P. J. 1998.** *Breach Growth in Sand-Dikes*. Dissertação de Doutorado : Technische Universiteit Delft, Delft (não publicado), 1998.

**Von Thun, J. e Gillette, D. 1990.** *Guidance on Breach Parameters, unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation*. Denver, Colorado : s.n., 1990.

**Wahl, T. L. 1997.** *Predicting Embankment Dam Breach Parameters – A Needs Assessment, Proceedings of Energy and Water: Sustainable Development*. São Francisco : s.n., 1997.

**Wahl, T. L. 1998.** *Predicting Embankment Dam Breach Parameters*. São Francisco : s.n., 1998.

**Wahl, T. L. 2001.** *The Uncertainty of Embankment Dam Breach Parameter Predictions Based on Dam Failure Case Studies*. *Proceedings of USDA/FEMA Workshop on Issues - Resolutions and Research Needs Related to Dam Failure Analysis* : Oklahoma City, 2001.

**Wahl, T. L. 2004.** *Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters*. In *Journal of Hydraulic Engineering* (pp. 389-397, Vol. 130(5)) : s.n., 2004.

**Walder, J. S. e O'Connor, J. E. 1997.** *Methods for Predicting Peak Discharges of Floods Caused by Failure of Natural and Constructed Dams*. In *Water Resources Research*, Vol. 33, N. 10 (pp. 2337-2348). 1997.

**Wang, Z., e Bowles, D. 2006.** *Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 1: theory and methodology*. *Advances in Water Resources* 29 (2006) , 1528–1545, 2006.

## **ANEXOS**





**ANEXO A - Dados utilizados na proposta de classificação do conjunto  
barragem/albufeira**



Quadro A.1 - Dados utilizados na proposta de classificação do conjunto barragem/albufeira referentes à barragem de Castlewood

Castlewood									
Vi (m <sup>3</sup> )		altura da barragem e área da albufeira		Características da brecha				Parâmetros de classificação do conjunto barragem albufeira	
4230000									
proporção	V	h <sub>D</sub>	A(alb)	C <sub>sb</sub>	C <sub>v</sub>	β <sub>sb</sub>	W <sub>f</sub>	n*	α*
1,8	7614000	21,34	356795	0,00530	1,00	1	44,2	783,483	0,002559
12,0	49491000	21,34	2319166	0,00100	1,00	1	44,2	5092,64	0,000483
11,0	44838000	21,34	2101125	0,00128	1,00	1	44,2	4613,84	0,000618
3,1	13113000	21,34	614480	0,00350	1,00	1	44,2	1349,33	0,00169
3,2	13536000	21,34	634302	0,00530	0,30	1	44,2	1392,86	0,002559
3,4	14382000	21,34	673946	0,00100	0,30	1	44,2	1479,91	0,000483
3,1	13113000	21,34	614480	0,00128	0,30	1	44,2	1349,33	0,000618
1,7	7191000	21,34	336973	0,00350	0,30	1	44,2	739,956	0,00169
1,6	6768000	21,34	317151	0,00530	2,21	1	44,2	696,429	0,002559
4,1	17343000	21,34	812699	0,00100	2,21	1	44,2	1784,6	0,000483
3,3	13959000	21,34	654124	0,00128	2,21	1	44,2	1436,39	0,000618
2,3	9729000	21,34	455904	0,00350	2,21	1	44,2	1001,12	0,00169
0,2	846000	21,34	39644	0,00430	1,00	2	44,2	87,0537	0,00959
2,3	9729000	21,34	455904	0,00080	1,00	2	44,2	1001,12	0,001784
0,5	2115000	21,34	99110	0,00290	1,00	2	44,2	217,634	0,006468
0,8	3384000	21,34	158575	0,00240	1,00	2	44,2	348,215	0,005353
1,5	6345000	21,34	297329	0,00430	0,30	2	44,2	652,903	0,002877
4,1	17343000	21,34	812699	0,00080	0,30	2	44,2	1784,6	0,000535
2,7	11421000	21,34	535192	0,00290	0,30	2	44,2	1175,22	0,00194
3,0	12690000	21,34	594658	0,00240	0,30	2	44,2	1305,81	0,001606
0,3	1269000	21,34	59466	0,00430	2,21	2	44,2	130,581	0,021195
2,0	8460000	21,34	396439	0,00080	2,21	2	44,2	870,537	0,003943
0,7	2961000	21,34	138754	0,00290	2,21	2	44,2	304,688	0,014294
0,4	1692000	21,34	79288	0,00240	2,21	2	44,2	174,107	0,01183

Vi – volume original da albufeira

Unidades das variáveis:

- V (m <sup>3</sup> )	- C <sub>s,b</sub> (m <sup>1-β<sub>s,b</sub></sup> s <sup>-1+β<sub>s,b</sub></sup> )	- W <sub>f</sub> (m)
- h <sub>D</sub> (m)	- C <sub>v</sub> (m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> )	- n* (-)
- A (albufeira) (m <sup>2</sup> )	- β <sub>s,b</sub> (-)	- α* (-)

Quadro A.2- Dados utilizados na proposta de classificação do conjunto barragem/albufeira referentes à barragem de Goose Creek

## Goose Creek

Volumes

Vi (m <sup>3</sup> )
----------------------

10600000

Altura da  
barragem e  
área da  
albufeira

Características da brecha

Parâmetros de  
classificação do  
conjunto barragem  
albufeira

Proporção	V	h <sub>D</sub>	A(alb) m <sup>2</sup>	C <sub>s,b</sub>	C <sub>v</sub>	β <sub>s,b</sub>	W <sub>f</sub>	n*	α*
0,0500	530000	6,1	86885	0,00530	1,00	1	26,4	2335,0	0,0012246
0,1000	1060000	6,1	173771	0,00100	1,00	1	26,4	4670,0	0,0002311
0,0500	530000	6,1	86885	0,00128	1,00	1	26,4	2335,0	0,0002958
0,1000	1060000	6,1	173771	0,00350	1,00	1	26,4	4670,0	0,0008087
0,0050	53000	6,1	8689	0,00530	0,30	1	26,4	233,5	0,0012246
0,0500	530000	6,1	86885	0,00100	0,30	1	26,4	2335,0	0,0002311
0,0250	265000	6,1	43443	0,00128	0,30	1	26,4	1167,5	0,0002958
0,0750	795000	6,1	130328	0,00350	0,30	1	26,4	3502,5	0,0008087
0,0250	265000	6,1	43443	0,00530	2,21	1	26,4	1167,5	0,0012246
0,1500	1590000	6,1	260656	0,00100	2,21	1	26,4	7005,0	0,0002311
0,0750	795000	6,1	130328	0,00128	2,21	1	26,4	3502,5	0,0002958
0,0250	265000	6,1	43443	0,00350	2,21	1	26,4	1167,5	0,0008087
0,0100	106000	6,1	17377	0,00430	1,00	2	26,4	467,0	0,0024539
0,0500	530000	6,1	86885	0,00080	1,00	2	26,4	2335,0	0,0004565
0,0250	265000	6,1	43443	0,00290	1,00	2	26,4	1167,5	0,001655
0,0100	106000	6,1	17377	0,00240	1,00	2	26,4	467,0	0,0013696
0,0075	79500	6,1	13033	0,00430	0,30	2	26,4	350,2	0,0007362
0,0500	530000	6,1	86885	0,00080	0,30	2	26,4	2335,0	0,000137
0,0500	530000	6,1	86885	0,00290	0,30	2	26,4	2335,0	0,0004965
0,0250	265000	6,1	43443	0,00240	0,30	2	26,4	1167,5	0,0004109
0,0050	53000	6,1	8689	0,00430	2,21	2	26,4	233,5	0,0054231
0,0750	795000	6,1	130328	0,00080	2,21	2	26,4	3502,5	0,001009
0,0250	265000	6,1	43443	0,00290	2,21	2	26,4	1167,5	0,0036575
0,0075	79500	6,1	13033	0,00240	2,21	2	26,4	350,2	0,0030269

Vi – volume original da albufeira

Unidades das variáveis:

- V (m <sup>3</sup> )	- C <sub>s,b</sub> (m <sup>1-β<sub>s,b</sub></sup> s <sup>-1+β<sub>s,b</sub></sup> )	- W <sub>f</sub> (m)
- h <sub>D</sub> (m)	- C <sub>v</sub> (m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> )	- n* (-)
- A (albufeira) (m <sup>2</sup> )	- β <sub>s,b</sub> (-)	- α* (-)

Quadro A.3 - Dados utilizados na proposta de classificação do conjunto barragem/albufeira referentes à barragem de Oros

Oros									
Vi (m <sup>3</sup> )	650000000	Altura da barragem e área da albufeira		Características da brecha				Parâmetros de classificação do conjunto barragem albufeira	
proporção	V	h <sub>D</sub>	A(alb) m <sup>2</sup>	C <sub>sb</sub>	C <sub>v</sub>	β <sub>sb</sub>	W <sub>f</sub>	n*	α*
0,075	48750000	35,36	1378676	0,00530	1,00	1	165	1102,65	0,001136
0,200	130000000	35,36	3676471	0,00100	1,00	1	165	2940,401	0,000214
0,200	130000000	35,36	3676471	0,00128	1,00	1	165	2940,401	0,000274
0,150	97500000	35,36	2757353	0,00350	1,00	1	165	2205,301	0,00075
0,075	48750000	35,36	1378676	0,00530	0,30	1	165	1102,65	0,001136
0,300	195000000	35,36	5514706	0,00100	0,30	1	165	4410,602	0,000214
0,150	97500000	35,36	2757353	0,00128	0,30	1	165	2205,301	0,000274
0,150	97500000	35,36	2757353	0,00350	0,30	1	165	2205,301	0,00075
0,300	195000000	35,36	5514706	0,00530	2,21	1	165	4410,602	0,001136
0,600	390000000	35,36	11029412	0,00100	2,21	1	165	8821,203	0,000214
0,500	325000000	35,36	9191176	0,00128	2,21	1	165	7351,003	0,000274
0,300	195000000	35,36	5514706	0,00350	2,21	1	165	4410,602	0,00075
0,025	16250000	35,36	459558,8	0,00430	1,00	2	165	367,5501	0,00548
0,200	130000000	35,36	3676471	0,00080	1,00	2	165	2940,401	0,001019
0,025	16250000	35,36	459559	0,00290	1,00	2	165	367,5501	0,003696
0,025	16250000	35,36	459558,8	0,00240	1,00	2	165	367,5501	0,003058
0,050	32500000	35,36	919118	0,00430	0,30	2	165	735,1003	0,001644
0,400	260000000	35,36	7352941	0,00080	0,30	2	165	5880,802	0,000306
0,150	97500000	35,36	2757353	0,00290	0,30	2	165	2205,301	0,001109
0,150	97500000	35,36	2757353	0,00240	0,30	2	165	2205,301	0,000918
0,008	4875000	35,36	137868	0,00430	2,21	2	165	110,265	0,01211
0,025	16250000	35,36	459559	0,00080	2,21	2	165	367,5501	0,002253
0,008	4875000	35,36	137868	0,00290	2,21	2	165	110,265	0,008167
0,025	16250000	35,36	459559	0,00240	2,21	2	165	367,5501	0,006759

Vi – volume original da albufeira

Unidades das variáveis:

- V (m <sup>3</sup> )	- C <sub>s,b</sub> (m <sup>1-β<sub>s,b</sub></sup> s <sup>-1+β<sub>s,b</sub></sup> )	- W <sub>f</sub> (m)
- h <sub>D</sub> (m)	- C <sub>v</sub> (m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> )	- n* (-)
- A (albufeira) (m <sup>2</sup> )	- β <sub>s,b</sub> (-)	- α* (-)

Quadro A.4 - Dados utilizados na proposta de classificação do conjunto barragem/albufeira referentes à barragem de South Fork

		South Fork						Parâmetros de classificação do conjunto barragem albufeira	
Vi (m <sup>3</sup> )		Altura da barragem e área da albufeira		Características da brecha					
19000000									
proporção	V	h <sub>D</sub>	A(alb)	C <sub>sb</sub>	C <sub>v</sub>	β <sub>sb</sub>	W <sub>f</sub>	n*	α*
1,70	32300000	38,1	847769	0,00530	1,00	1	94,5	584,0198	0,002137
4,40	83600000	38,1	2194226	0,00100	1,00	1	94,5	1511,581	0,000403
3,40	64600000	38,1	1695538	0,00128	1,00	1	94,5	1168,04	0,000516
1,70	32300000	38,1	847769	0,00350	1,00	1	94,5	584,0198	0,001411
2,10	39900000	38,1	1047244	0,00530	0,30	1	94,5	721,4363	0,002137
7,00	133000000	38,1	3490814	0,00100	0,30	1	94,5	2404,788	0,000403
6,50	123500000	38,1	3241470	0,00128	0,30	1	94,5	2233,017	0,000516
2,90	55100000	38,1	1446194	0,00350	0,30	1	94,5	996,2691	0,001411
1,60	30400000	38,1	797900	0,00530	2,21	1	94,5	549,6657	0,002137
6,40	121600000	38,1	3191601	0,00100	2,21	1	94,5	2198,663	0,000403
6,50	123500000	38,1	3241470	0,00128	2,21	1	94,5	2233,017	0,000516
2,30	43700000	38,1	1146982	0,00350	2,21	1	94,5	790,1445	0,001411
0,30	5700000	38,1	149606	0,00430	1,00	2	94,5	103,0623	0,010701
2,60	49400000	38,1	1296588	0,00080	1,00	2	94,5	893,2068	0,001991
0,60	11400000	38,1	299213	0,00290	1,00	2	94,5	206,1246	0,007217
0,80	15200000	38,1	398950	0,00240	1,00	2	94,5	274,8329	0,005973
2,70	51300000	38,1	1346457	0,00430	0,30	2	94,5	927,5609	0,00321
6,10	115900000	38,1	3041995	0,00080	0,30	2	94,5	2095,601	0,000597
3,40	64600000	38,1	1695538	0,00290	0,30	2	94,5	1168,04	0,002165
3,90	74100000	38,1	1944882	0,00240	0,30	2	94,5	1339,81	0,001792
0,15	2850000	38,1	74803	0,00430	2,21	2	94,5	51,53116	0,023649
1,40	26600000	38,1	698163	0,00080	2,21	2	94,5	480,9575	0,0044
0,25	4750000	38,1	124672	0,00290	2,21	2	94,5	85,88527	0,015949
0,80	15200000	38,1	398950	0,00240	2,21	2	94,5	274,8329	0,0132

Vi – volume original da albufeira

Unidades das variáveis:

- V (m <sup>3</sup> )	- C <sub>s,b</sub> (m <sup>1-β<sub>s,b</sub></sup> s <sup>-1+β<sub>s,b</sub></sup> )	- W <sub>f</sub> (m)
- h <sub>D</sub> (m)	- C <sub>v</sub> (m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> )	- n* (-)
- A (albufeira) (m <sup>2</sup> )	- β <sub>s,b</sub> (-)	- α* (-)